



Università degli Studi di Genova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA, ENERGETICA, GESTIONALE
E DEI TRASPORTI

Corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica Energetica e Gestionale
Meccanica, Misure e Robotica

TESI DI DOTTORATO

Laser in Metal Additive Manufacturing

Candidato:
Laura Chiara Pedemonte
Matricola 2141075

Relatore:
Chiar.ma Prof.ssa Armanda Barbangelo

Anno Accademico 2018–2019

Indice

Introduzione	1
Genesi delle tecnologie additive	5
0.1 La stereolitografia	9
0.2 3D Printing ed Ink Jet Printing	10
0.3 Fused Deposition Modeling	11
Tecnologie additive per materiali metallici	13
0.4 Laser Engineered Net Shaping	14
0.5 Laminated Object Manufacturing	15
0.6 Wire-feed Technology	16
0.7 Selective Laser Sintering	17
0.8 Selective Laser Melting	19
0.9 Direct ed Indirect Metal Laser Sintering	20
0.10 Electron Beam Melting	22
0.11 Ultrasonic Consolidation	23
Influenza dei parametri di processo sul prodotto finito	25
0.12 Influenza dei parametri di processo sulla finitura superficiale	27
0.13 Influenza dei parametri di processo sulla densità e sulle proprietà meccaniche	28
0.13.1 Porosità e densità	28
0.13.2 Ossidazioni	29
0.13.3 Influenza delle materie prime impiegate	29
0.13.4 Microfratture	30
0.13.5 Influenza della fonte energetica impiegata	30
0.13.6 Proprietà meccaniche	31
0.13.7 Altre influenze	32
Norme tecniche sulla manifattura additiva e prove per il controllo della qualità	33
0.14 Norme tecniche	33
0.15 I controlli non distruttivi per le AM	38
0.15.1 Liquidi penetranti	39
0.15.2 Radiografia	39
0.15.3 Tomografia computerizzata	39
0.15.4 Ultrasuoni	40
0.16 I controlli distruttivi per le AM	41

Alcuni metodi per la creazione di polveri metalliche	43
Prove sperimentali su lega di nichel	45
0.17 Materiali e metodi	45
0.18 La EOS M290: procedure per la realizzazione di manufatti	45
0.18.1 Procedure per la predisposizione del macchinario ed avvio del <i>job</i>	50
0.18.2 Rimozione del <i>job</i>	67
0.18.3 Sostituzione dei filtri e del contenitore di raccolta delle polveri	68
0.19 Controlli non distruttivi	69
0.19.1 Tomografia assiale computerizzata	69
0.19.2 Ultrasuoni	74
0.19.3 Prova di trazione	83
0.19.4 Indagini microstrutturali	84
0.20 Risultati	86
0.20.1 Tomografia assiale computerizzata	86
0.20.2 Ultrasuoni	86
0.20.3 Prove di trazione	86
0.20.4 Indagini microstrutturali	86
0.21 Discussione	88
Prove sperimentali sul titanio grado 2	89
0.22 Materiali e metodi	89
0.23 Discussione	93
0.23.1 Analisi superficiale dei campioni in titanio grado 2	93
0.23.2 Analisi microstrutturale dei campioni in titanio grado 2	97
0.23.3 Durezza dei campioni titanio grado 2	115
Conclusioni	121
Bibliografia	125

Indice delle abbreviazioni

AFRL	Air Force Research Laboratory
AITA	Associazione Italiana Tecnologie Additive
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Binder Jetting
CEN	European Committee for Standardization
CVD	Chemical Vapour Deposition
DED	Direct-Energy Deposition
DM	Direct Manufacturing
DMLM	Direct Metal Laser Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBF3	Electron Beam Freeform Fabrication
EBM	Electron Beam Melting
EWf	European Welding Federation
FDM	Fused Deposition Modeling
FGM	Functionally Graded Materials
FM	Full Melting
GARPA	Global Alliance of Rapid Prototyping Association
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten arc Welding
HIP	Hot Isostatic Pressing
IIS	Istituto Italiano della Saldatura
IJP	Ink Jet Printing
ISO	International Organization for Standardization
LED	Linear Energy Densities
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LMWD	Laser Metal Wire Deposition

LoF	Lack of Fusion
LOM	Laminated Object Manufacturing
LPS	Liquid Phase Sintering
ME	Material Extrusion
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJ	Material Jetting
NAMII	National Additive Manufacturing Innovation Institute
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDT	Non Destructive Test
PAW	Plasma Arc Welding
PBF	Powder Bed Fusion
PVD	Physical Vapour Deposition
RE	Reverse Engineering
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
SFF	Solid Free-form Fabrication
SL	Sheet Lamination
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SSS	Solid State Sintering
UC	Ultrasonic Consolidation
VP	Vat Photopolymerization
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing
WFT	Wire-feed Technology
WLAM	Wire and Laser Additive Manufacturing
XCT	X-ray Computed Tomography
3DP	Three Dimensional Printing

Introduzione

La possibilità di creare manufatti tridimensionali a partire da un disegno CAD-3D permette di realizzare oggetti che con i metodi di fabbricazione convenzionale possono essere estremamente difficili da ottenere, se non impossibili. Grazie alle *Solid Freeform Fabrication* (SFF) sono attualmente producibili, ad esempio, strutture trabecolari che presentano dimensioni e masse estremamente ridotte.

Tramite un macchinario SFF è possibile realizzare contemporaneamente diversi manufatti nello stesso *job*: in ambito odontoiatrico, possono essere create simultaneamente diverse corone e un buon numero di ponti, riducendo così il numero di ore necessarie per la loro realizzazione, rispetto a quelle occorrenti con i metodi classici. Un ulteriore vantaggio nella produzione *Additive Manufacturing* (AM) è la tipologia del materiale di consumo, ovvero le polveri metalliche che, se non sinterizzate, possono essere riciclate nei processi successivi [1, 2]. Le tecnologie SFF presentano notevoli vantaggi e benefici, ma anche qualche inconveniente per salute dell'uomo (se inalate, le polveri metalliche, possono restare intrappolate nei tessuti polmonari e provocare asbestosi o a carcinoma) e sull'ambiente (pericolo di incendio o esplosioni; elevato consumo di energia durante i processi di fabbricazione; difficoltà nel sistema di riciclaggio dei manufatti; potenziali emissioni tossiche o dannose sul territorio sono in via di studio) [3].

Nell'ambito di questa tesi sono state svolte analisi sull'Inconel-625, ovvero una lega di nichel molto apprezzata in ambito industriale [4] grazie alle sue caratteristiche, quali l'elevata resistenza alle alte temperature, alla corrosione, all'ossidazione e all'usura oltre che alla notevole tolleranza agli stress meccanici e termici. Questo tipo di materiale mal si presta alla lavorazione con tecniche convenzionali, al contrario le tecniche additive ed in particolare la DMLS, premettono di lavorare al meglio questo tipo di lega.

Su campioni di questa lega, generati mediante processo *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS, sono state effettuate analisi non distruttive, presso l'Istituto Italiano di Saldatura - I.I.S, in collaborazione con il suo staff.

È stato realizzato in Inconel-625 un blocco campione in cui sono stati inseriti difetti creati ad arte, per valutare l'efficacia nella loro rilevazione, attraverso un'indagine tomografica. La tomografia è stata realizzata presso e in cooperazione con la *Laboramet 2* di Torino.

Ho svolto, sempre in collaborazione con lo staff I.I.S, delle ispezioni agli ultrasuoni per valutare l'anisotropia del materiale e quindi la sua saldabilità: spesso è necessario saldare tra loro diversi manufatti per ottenere il prodotto voluto, poiché le camere di processo dei macchinari AM che lavorano polveri metalliche, hanno dimensioni ancora piuttosto contenute.

I manufatti ottenuti con le prime tecnologie SFF (un tempo definite tecniche di "prototipazione rapida" o "Rapid Prototyping" - RP) fino a qualche decennio fa, non fornivano caratteristiche e proprietà meccaniche adeguate per la realizzazione di impianti dentali [50, 6]. Anche le polveri metalliche, erano scarsamente presenti sul mercato.

Grazie alla ricerca costante ed ai sostanziosi investimenti nel settore delle SFF, nell'ultimo decennio, le leghe a disposizione, benché ancora in numero ridotto; sono aumentate esponenzialmente e le loro caratteristiche (in particolare la granulometria che influisce sulla tenacità e sulle porosità del prodotto finito) si sono particolarmente affinate [7].

Le caratteristiche del manufatto dipendono, oltre che dalle caratteristiche delle polveri adottate, anche dal tipo di tecnologia scelta e dalla sorgente di energia che questa utilizza (laser, fascio di elettroni, ultrasuoni, ecc); nonché dai parametri di processo selezionati [73, 68, 81, 82, 59, 13, 14].

Le tecnologie AM consentono di sviluppare un oggetto tridimensionale aggiungendo materiale allo strato precedente e non rimuovendolo, come avviene i processi di lavorazione convenzionali.

In generale un oggetto può essere creato tramite un software 3D (normalmente un CAD-3D), ma anche grazie ad un processo di *Reverse Engineering* (RE) [50, 73, 36, 57, 58].

Attualmente gli scanner ottici per RE sono per lo più portatili, facili da utilizzare, ed in grado di catturare geometrie complesse e piccoli dettagli in poco tempo (minuti), con notevole precisione ed elevata risoluzione.

Una volta acquisita la scansione è possibile processarla tramite un opportuno software (normalmente *Magic* di *SOLIDWORKS*) per ottenere sia l'oggetto da mandare in stampa che i suoi eventuali supporti; entrambi contenuti in un unico file da inviare al macchinario. Quest'ultimo file verrà poi sezionato in piani di spessore opportuno, in base alla granulometria delle polveri da processare, per la realizzazione fisica del manufatto.

La possibilità di creare un manufatto ad hoc per ogni paziente rende le tecnologie AM ideali per l'ambito medico, in modo particolare per i campi ortodontico ed odontoiatrico.

Storicamente furono Deckard e Beaman [35] che nel 1988 utilizzarono per la prima volta un processo AM, ovvero il *Selective Laser Sintering* - SLS, per la produzione di manufatti metallici. Nel 2012 *Gu et al.* [25] hanno effettuato numerose analisi per valutare i parametri del fascio laser ottimali (in termini di rapporto tra la potenza erogata P e la velocità di scansione v , termine che il team ha indicato con *Linear Energy Densities* - LED = $\frac{P}{v}$ J/m) per realizzare campioni in titanio grado 2, con processo *Selective Laser Melting* - SLM, che rispondessero a caratteristiche microstrutturali e meccaniche adatte per il campo biomedicale. Il team di ricercatori trovò una finestra di valori adeguati a tal fine (LED pari a 300 J/m, velocità di scansione 300 mm/s), ottenendo campioni con microstruttura di tipo martensitica aciculare α' molto fine, con densità 3.89 GPa ($HV = 306$).

Dal 2015 la EOS promuove la tecnologia *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS per la creazione di protesi dentali removibili, le prime polveri impiegate furono cobalto-cromo SP2 [29, 33]. Nel 2014 *Attar et al.* [6] hanno realizzato via *Selective Laser Melting* - SLM dei provini per impianti biomedicali in titanio grado 2, che

non si sono rivelati adeguati allo scopo, a causa delle diffuse porosità e di ampie zone con presenza di particelle non completamente fuse. Lo sviluppo delle tecniche SFF tuttavia è talmente rapido che, già nel 2015, il team di Attar [34] ha ottenuto risultati soddisfacenti confrontando dei campioni generati via SLM con altri ottenuti da lavorazione classica.

Per la realizzazione di protesi dentali viene spesso utilizzata la lega Ti-4Al-6V che ha un costo contenuto, sia per le lavorazioni classiche che in forma di polveri per tecnologie SFF. La lega però contiene vanadio che, al pari del nichel, può sviluppare nel paziente forme allergiche ed intolleranze anche gravi che possono condurre al rigetto dell'impianto, sia fisso che mobile, e quindi alla completa rimozione [18, 19, 20]; inoltre la presenza di vanadio e alluminio nel lungo periodo può condurre al malattie degenerative quali Alzheimer, neuropatia periferica e osteomalacia [21].

Il titanio, al contrario, non è allergenico; è inerte per il corpo umano; presenta elevata bio-tollerabilità; è un materiale estremamente leggero ed il suo modulo elastico è molto simile a quello del tessuto osseo; caratteristica che lo rende particolarmente idoneo per la realizzazione di impianti o protesi dentali visto che non si sviluppano tensioni residue tra la struttura implantare e l'osso del paziente. Il titanio non è soggetto a corrosione poiché in presenza di ossigeno passiva, ovvero si ricopre di un sottile strato di ossidi tra cui l'ossido di titanio o rutilio (TiO), il biossido di titanio (TiO_2) ed altri (Ti_2O_3 e Ti_3O_4). Questa pellicola presenta un'elevata tenacità, è molto omogenea e aderente e, se asportata, si riforma istantaneamente in 1 msec. Da questa pellicola placca e tartaro si rimuovono con estrema facilità; le viene inoltre attribuita un'azione batteriostatica.

Il titanio, quindi, ha una durezza ed una resistenza alla masticazione ottimali sia per l'osteointegrazione di un impianto nel paziente, ma anche per un impianto mobile [22, 30, 31, 32].

Per questi motivi il titanio è largamente impiegato in campo ortodontico, in particolare il titanio grado due (standard ASTM F67-13: 2017) [23] che, oltre alla sua notevole bio-tollerabilità, presenta un'elevata resistenza alla corrosione e apprezzabile durezza. Di recente la EOS ha inserito tra le polveri di sua produzione, processabili DMLS tramite la M290, anche il titanio grado due (TiCp) [24].

Scopo di questa tesi è valutare se i manufatti generati tramite processo AM presentino caratteristiche idonee alla realizzazione di scheletrati e corone dentali. Per questo motivo sono stati creati diversi campioni, tutti in titanio grado due: due tramite processo classico di fusione e due campioni in additive, mediante la EOS M290 usando la *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS.

I campioni generati tramite fusione (un processo a basso costo che consente di ottenere manufatti dalle bene note caratteristiche) sono idonei alla generazione di corone dentali e scheletrati; quindi il confronto tra i campioni realizzati con questa ben nota tecnica e quelli generati via DMLS permette di stabilire se i manufatti AM siano idonei o meno allo scopo.

Sono state perciò confrontate le superfici, le microstrutture e le microdurezze, che sono significative delle proprietà meccaniche, dei diversi campioni per verificare se i manufatti AM mostrino le qualità e caratteristiche necessarie.

Genesi delle tecnologie additive

Il primo brevetto per tale manifattura, allora chiamata *stereolitografia* - *SL* fu depositato da Charles W. Hull alla fine degli anni '80 (US patent n. 4575330); da allora sono state sviluppate numerose e diverse tecniche. Il primo macchinario per la prototipazione rapida (RP) venne prodotto e commercializzato dalla *3D System Corporation* seguita dalla tedesca EOS, dalla giapponese CMET ed infine dalla cinese *Yinhua*. Da allora in America sono seguite altre centinaia di registrazioni (274 dal 1986 al 1988) [36].

In tempi rapidi si è riusciti a passare da semplici prototipi a prodotti finiti completi con riduzione dei tempi e dei costi della lavorazione [37, 38], anche se inizialmente si riscontravano problemi se le dimensioni delle parti da produrre erano eccessive rispetto alla camera di costruzione. Anche i materiali di consumo inizialmente erano limitati in numero, solo anni di studi hanno permesso di aumentarne la quantità [39, 40, 49].

La prima associazione che trattò queste nuove tecnologie fu l'americana GAR-PA (*Global Alliance of Rapid Prototyping Association*) nel 1986, tutt'ora esistente [42], tra i consociati ricordiamo il *NAMII* (*National Additive Manufacturing Innovation Institute*), la *NASA*, la *AFRL* (*Air Force Research Laboratory*).

Anche l'Unione Europea ha creato nel 2007 una piattaforma per questi tipi di processi denominata *AM-Platform, European technology platform in additive manufacturing*. In Italia esiste dal 2014 una fondazione *AITA-Associazione Italiana Tecnologie Additive* [43, 44, 45]. In America invece dal 2009 si occupa di *Additive Manufacturing*, dette anche *Solid Freeform Fabrication*, il Comitato Tecnico F42 della *American Society for Testing and Materials* - *ASTM* [41].

Tale comitato ha di recente ripartito in sette gruppi i diversi processi additivi: Material Jetting, Binder Jetting, Vat Photopolymerization, Direct-Energy Deposition, Sheet Lamination e Material Extrusion, Powder Bed Fusion [46]. Tra questi, gli ultimi quattro permettono di realizzare oggetti in materiali metallici o anche compositi a gradiente funzionale (*Functionally Graded Materials* - *FGM*), ovvero oggetti progettati e realizzati con caratteristiche diverse da punto a punto [46, 47]. Queste si dividono in due gruppi: *bulk* e *thin* FGM. Le prime comprendono tecniche per la realizzazione di oggetti con un certo volume, ad esempio quelli con gradienti di densità come i processi a letto di polvere (*Selective Laser Sintering* e *Selective Laser Melting*) [47]. Appartengono invece al secondo gruppo le tecniche che sviluppano oggetti con gradienti superficiali tramite la deposizione di uno strato sottile di materiale, ad esempio la *Chemical Vapour Deposition* o la *Physical Vapour Deposition*) [47].

I materiali metallici utilizzabili per queste tecnologie sono in continuo aumento.

[49]

Tutte le tecniche AM rispettare una precisa sequenza di passi, Figura 1 per giungere al prodotto finito [50]:

- sviluppo di un modello solido con CAD-3D o *Solidworks* [51] o *Magics* di MaterialiseTM [52]) oppure generazione di un modello con scanner ottico (*reverse engineering*);
- conversione della superficie dell'oggetto in formato stereolitografico (.STL), ormai diventato lo standard industriale *de facto* [53];
- creazione degli eventuali supporti (detti anche vincoli) tramite software per la corretta crescita e l'estrazione del manufatto dalla macchina. Non sempre i vincoli sono necessari, la loro presenza o meno dipenda dalla tecnologia usata, dal materiale e dalla geometria del prodotto;
- sezionamento in piani del modello completo e suo trasferimento al macchinario per la realizzazione fisica. La posizione e all'orientamento del pezzo all'interno della camera di costruzione sono cruciali perché, se errati potrebbero compromettere il prodotto finito; in questo caso si parla di *crash* del manufatto;
- realizzazione del prodotto, di solito completamente automatizzata;
- estrazione dell'oggetto;
- rimozione dei supporti e pulizia del manufatto;
- eventuale trattamento superficiale e/o termico del prodotto.

I modelli 3D sviluppati tramite software devono rispettare le così dette "3F": Function, Fit and Form. La scelta dei materiali adottati influisce sulle caratteristiche del manufatto, fondamentali per il suo impiego ed utilizzo (Function). Il rispetto delle tolleranze dimensionali (Fit) e della forma (Form) è ovviamente fondamentale per il prodotto finito [50].

Esistono numerose tecniche che dipendono dal tipo di materiale usato per la realizzazione del prodotto. In Tabella 1 sono presentate alcune tecnologie SFF, differenziate per principio impiegato e per tipologia di materiale di consumo utilizzato. Le tecniche additive possono suddividersi in due categorie: quelle a elevato flusso energetico, che impiegano un fascio laser o di elettroni, e quelle ad estrusione o iniezione [36]. In Figura 2 possiamo osservare lo schema di principio dei processi *Material Jetting*, in Figura 3 quello dei processi *Binder Jetting*

Processo adottato	Tipologia di materiale	Tecnologie SFF
Polimerizzazione	Polimeri	Stereolithography (SL)
Incollaggio	Metallici, ceramici polimeri e sabbie	Binder Jetting (BJ)
Fusione	Metallici, ceramici	Laser Melting (LM)
Fusione	Metallici	Electron Beam Melting (EBM)
Fusione	polimeri	Laser Sintering (LS)
Fusione	polimeri	Material Jetting (MJ)
Estrusione	polimeri	Fused Deposition Modeling (FDM)

Tabella 1: Tecniche AM suddivise in base al tipo di processo adottato e al materiale di consumo.

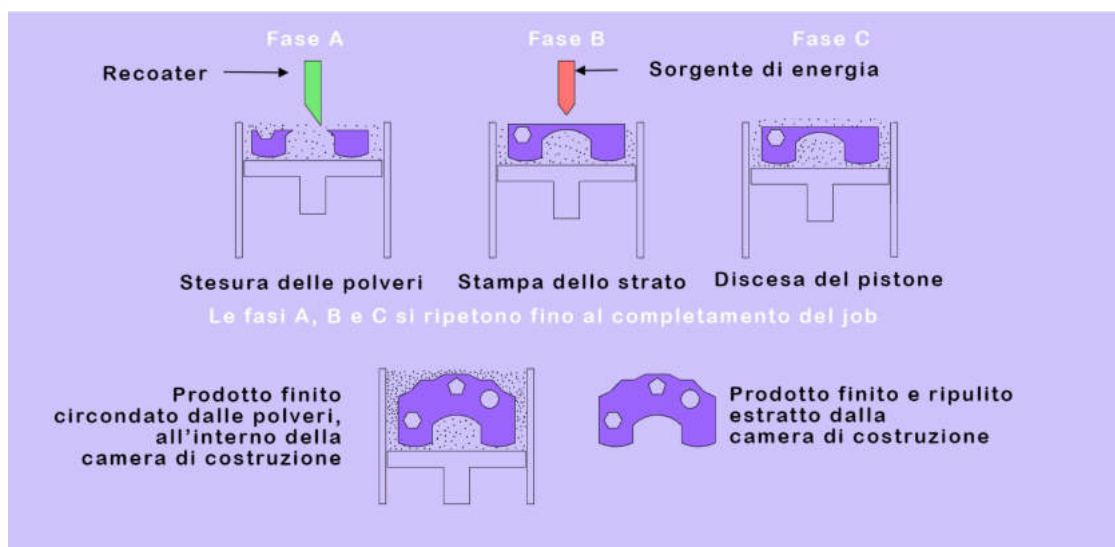


Figura 1: Rappresentazione schematica dell'iter da seguire per realizzare un oggetto in stampa 3D [58].

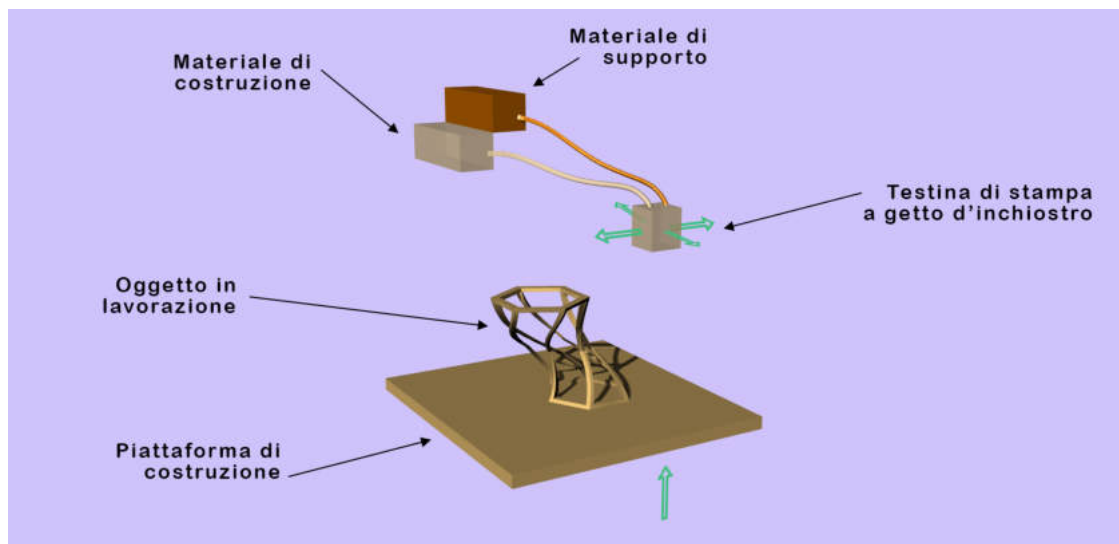


Figura 2: Schema generale per il funzionamento dei processi Material Jetting.

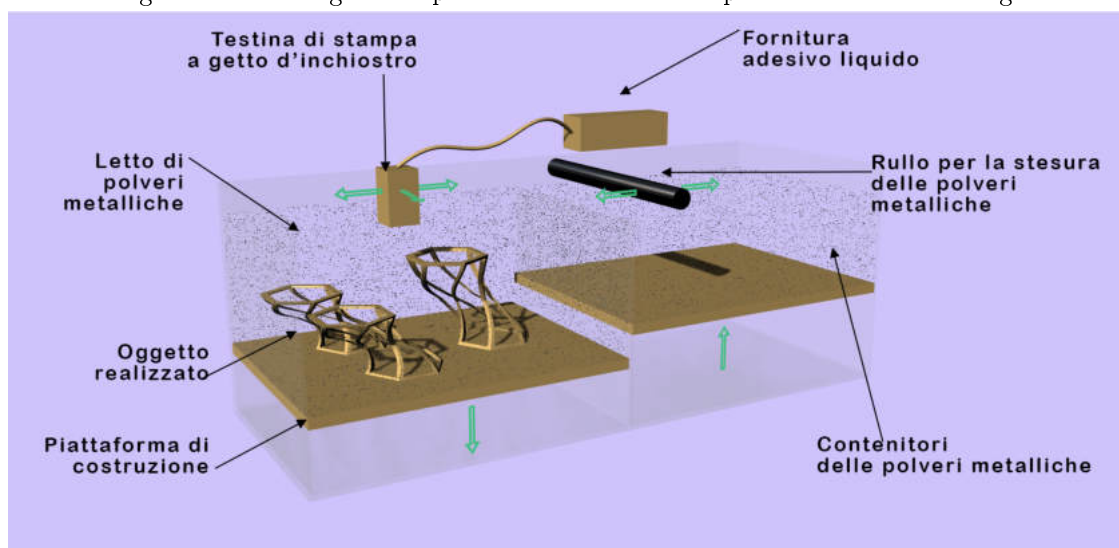


Figura 3: Schema generale per il funzionamento dei processi Binder Jetting.

0.1 La stereolitografia

Alla fine degli anni '80, per prima l'americana *3D Systems* brevettò e sviluppò la prima tecnica basata sulla manifattura additiva che chiamò *Stereolitografia per deposizione - SL* [55, 57].

Questa tecnica impiega un sorgente energetica a raggi UV ¹, una resina in fase liquida che solidifica una volta colpita dalla radiazione ultravioletta, un piano mobile elevatore e in ultimo un sistema di scansione a specchi ottici che riflette e focalizza il flusso laser sulla superficie del liquido e lo fa solidificare, Figura 4 [36].

Si crea un modello software dell'oggetto da realizzare seguendo i passi già illustrati nell'Introduzione . Attraverso questo processo si possono realizzare oggetti

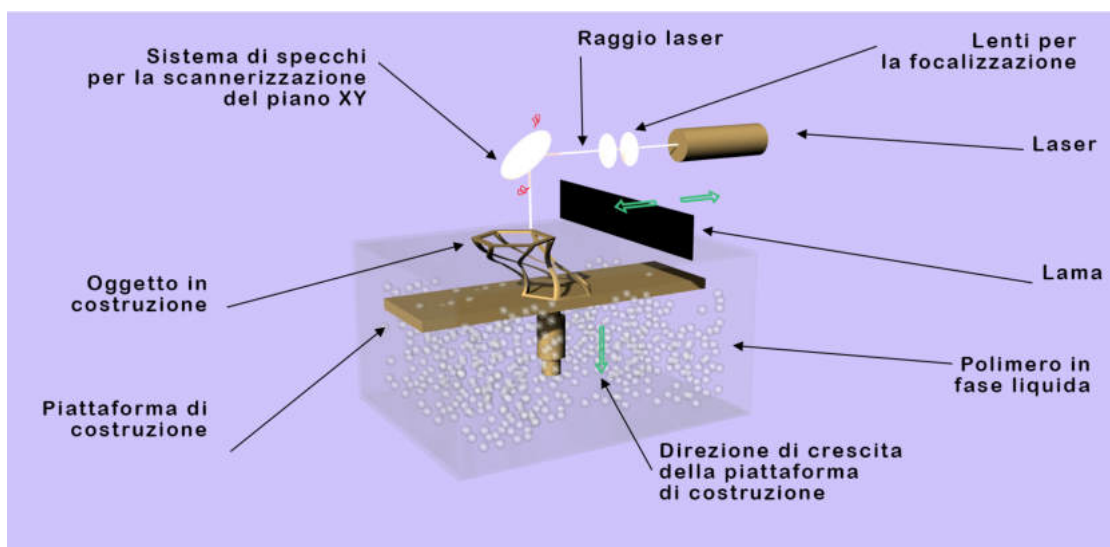


Figura 4: Rappresentazione schematica del processo stereolitografico.

di elevata qualità superficiale; ma è indispensabile impiegare anche materiale di supporto da processare via software assieme al prodotto. Oggi esistono diversi programmi di nuova generazione per questo scopo, come *VISTA* della *3D Systems*, *Magics* dell'azienda *Materialise* o *Bridgeworks* della *Solid Concepts*. Il processo stereolitografico può impiegare anche polveri ceramiche sospese in un liquido, generando così un oggetto in composito.

¹Di solito un laser allo stato solido in corrente continua (CW) ad argon, con lunghezza d'onda compresa tra 325 e 370 nm, potenze comprese tra 15 mW e 250 mW [36, 73]

0.2 3D Printing ed Ink Jet Printing

Fu il *MIT* (*Massachusetts Institute of Technology*) a coniare il termine *3D Printing* negli anni '90. La tecnica appartiene alla categoria estrusione o iniezione [36, 58]. L'idea dei ricercatori era creare modelli in ceramica porosa o stampi per metalli fusi che, se sottoposti a gradiente di pressione e penetrati con metallo in fase liquida, formano un materiale composito metallo-ceramico. Si può così creare un oggetto composito grazie all'adesione tra materiali metallici, ceramici e polimerici a costi contenuti, in tempi brevi e senza supporti [36].

Per realizzare l'oggetto è necessario seguire l'iter illustrato nell'Introduzione. ?? Il processo si concretizza con la deposizione di sottili strati di polveri incollati con un legante liquido (in un primo momento ossido di alluminio e silice colloidale) [58, 43]. La tecnica venne definita *Stampa 3D* perché il collante viene steso come l'inchiostro delle stampanti bi-dimensionali di uso comune: lo strato di collante che si applica sulle polveri disegna l'equivalente di piani bi-dimensionali, ma l'oggetto si sviluppa anche nella terza dimensione, Figura 5. Un volta ultimato il manufatto

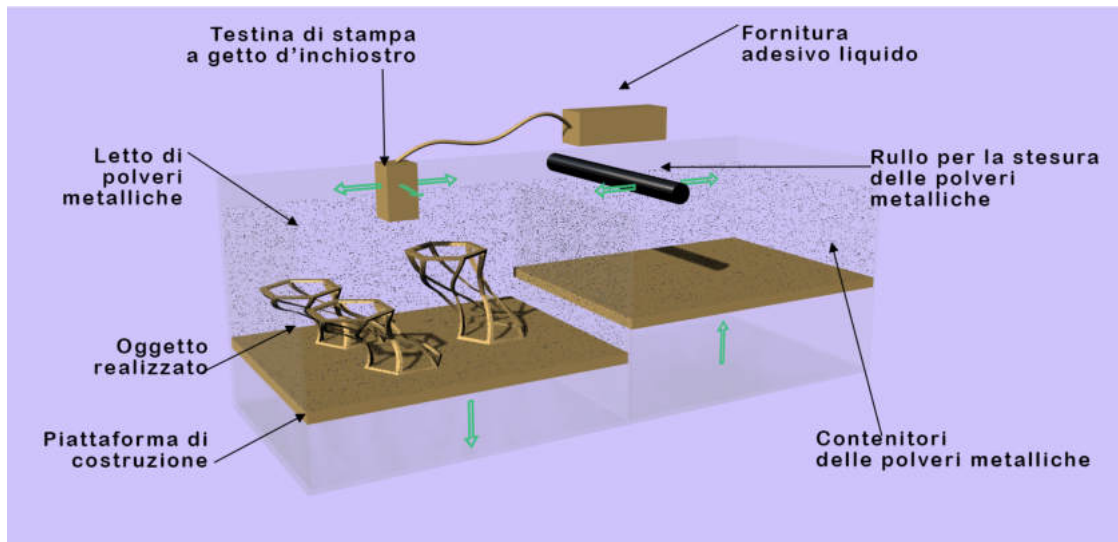


Figura 5: Schema del processo 3D Printing.[58]

potrebbe essere necessario un processo di cottura a temperatura elevata per rafforzare il legame tra gli strati.

Con la tecnica *Ink Jet Printing (IJP)* (categoria: estrusione o iniezione), l'oggetto si determina grazie a gocce di polimero termoplastico spruzzate da una stampante piezoelettrica a getto d'inchiostro che è stata modificata. [36].

0.3 Fused Deposition Modeling

La Fused Deposition Modeling FDM fu realizzata alla fine degli anni '80 dall'azienda americana *Stratasys* per produrre manufatti termoplastici, ad esempio in *ABS* (acrilonitrile-butadiene stirene) o in *PC* (policarbonato) [38, 43].

Anche in questo caso la realizzazione segue l'iter già descritto nel primo capitolo ???. Il materiale base per questa tecnica è un filamento termoplastico avvolto in bobine collocate a lato o sul retro del macchinario, su un mandrino. Il filamento viene entra in un estrusore removibile e viene riscaldato fino a raggiungere una temperatura superiore a quella di fusione, per cui nell'estrusore sarà in fase liquida, Figura 6.

Per tanto l'oggetto solidificherà immediatamente dopo l'estrusione e aderirà al

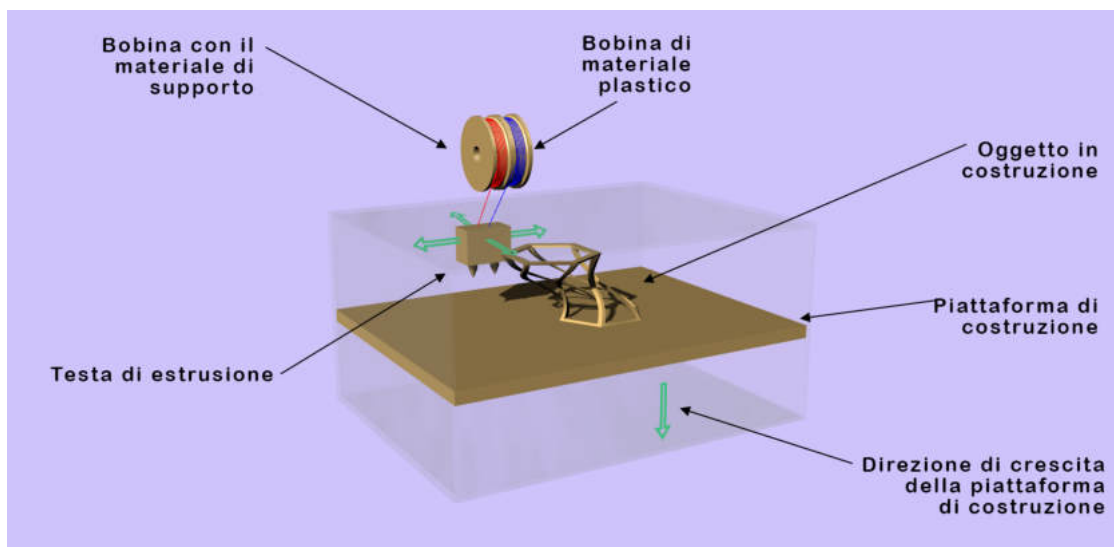


Figura 6: Rappresentazione schematica di un macchinario FDM.

piano generato in precedenza. L'oggetto viene sostenuto da un materiale di supporto che permette di mantenere la forma desiderata durante l'asciugatura.

Ad ogni nuovo piano, la piattaforma di lavoro, anch'essa riscaldata per favorire l'adesione dell'oggetto in costruzione, si abbasserà per favorire la creazione del nuovo piano fino ad ultimare il prodotto. Una volta terminato, l'oggetto può essere sottoposto a sabbiatura o lucidatura.

I vantaggi di questa tecnica consistono nel costo contenuto dei materiali utilizzati. Inoltre è agevole sostituire il filo poiché avvolto in bobine. Tra gli svantaggi vanno annoverati i tempi di realizzazione, anche piuttosto lunghi e i numerosi processi post-lavorazione necessari per una adeguata finitura superficiale.

Tecnologie additive per materiali metallici

Grazie ai notevoli investimenti e ai numerosi studi effettuati, attualmente le AM annoverano diversi e vari materiali base [43]. Quelli metallici possono assumere diverse forme: laminati, polveri o filo. Le tecnologie AM possono essere suddivise sia in base alla forma delle materie prime appena viste, sia in base alla fonte di energia impiegata (fascio di elettroni o laser) [43]. A seconda di quest'ultima si sceglie il formato più adatto per il materiale da impiegare (Tabella 2). Un'ulteriore

Fonte di energia	Forma della materia prima	Tecnologia AM
Laser	Polveri	<i>Laser Engineered Net Shaping (LENS)</i>
Laser	Laminato	<i>Laminated Object Manufacturing (LOM)</i>
Laser	Filo metallico	<i>Laser Metal Wire Deposition (LMWD)</i>
Laser	Polveri	<i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>
Laser	Polveri	<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>
Laser	Polveri	<i>Direct Metal Laser Sintering (DMLS)</i>
Fascio di elettroni	Filo metallico	<i>Directed Energy Deposition (DED)</i>
Fascio di elettroni	Polveri	<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>
Ultrasuoni	Laminato	<i>Ultrasonic consolidation (UC)</i>

Tabella 2: I processi additivi per la realizzazione di oggetti metallici classificate in base alla fonte di energia e al tipo di materia prima.

suddivisone delle tecniche SFF può essere fatta in funzione del materiale usato: le tecniche a "letto di polveri" e a "polvere iniettata". Questa viene diretta verso il substrato su cui accresce il manufatto con un ugello, contemporaneamente il fascio laser solidale con il getto la fonde oppure la sinterizza. Grazie a queste tecniche possono essere creati oggetti piuttosto voluminosi oppure si possono riparare manufatti danneggiati. L'approccio è di due tipi: o l'oggetto in produzione si sposta in basso con il piano di costruzione e la testa del laser resta ferma; oppure è la testa del laser che si alza ed il manufatto resta fermo. Comunque, per evitare l'ossidazione e migliorare la qualità superficiale del manufatto in costruzione o in riparazione, si usano sempre gas inerti [43].

Le tecniche SFF a filo metallico posso essere di tre tipi: con laser, con fascio elettronico oppure saldatura ad arco[75].

Vediamo ora alcuni processi SFF che utilizzano materiale metallico polverizzato come base per la lavorazione.

0.4 Laser Engineered Net Shaping

La *Laser Engineered Net Shaping* - *LENS*, detta anche *3-D laser cladding*, venne ideata e sviluppata verso la fine degli anni '90 dalla *Optomec Inc.* nei laboratori *Sandia National Laboratories* in collaborazione con la *Pratt & Whitney*. La LENS fa parte delle tecniche a polvere iniettata. A differenza delle altre tecniche AM può essere usata per riparare oggetti metallici finiti oltre che per realizzarne di nuovi; per questo viene anche definita "*disruptive additive process*", a suggerire la possibilità di *pensare fuori dagli schemi* [65, 67].

Per creare l'oggetto, si segue la consueta procedura. In questo caso la fonte energetica è un laser CO₂, oppure Nd:YAG o ancora in fibra, che fonde le polveri iniettate tramite un getto. Il laser scansiona il piano *xy* eseguendo le informazioni fornite dal software, mentre lo sviluppo lungo l'asse *z* si verifica tramite l'iniezione graduale di un getto di polveri, di norma coassiale con il fascio laser e perpendicolare al piano generato in precedenza. Il getto di polveri potrebbe essere sfasato rispetto al fascio del laser da 0° (coassiale) fino a 45°; in questo caso si dice che la deposizione passa da "letto di polveri" ad "iniezione di polveri" [67]. La procedura si ripete fino al completamento dell'oggetto, Figura 7. Eventuali imperfezioni o

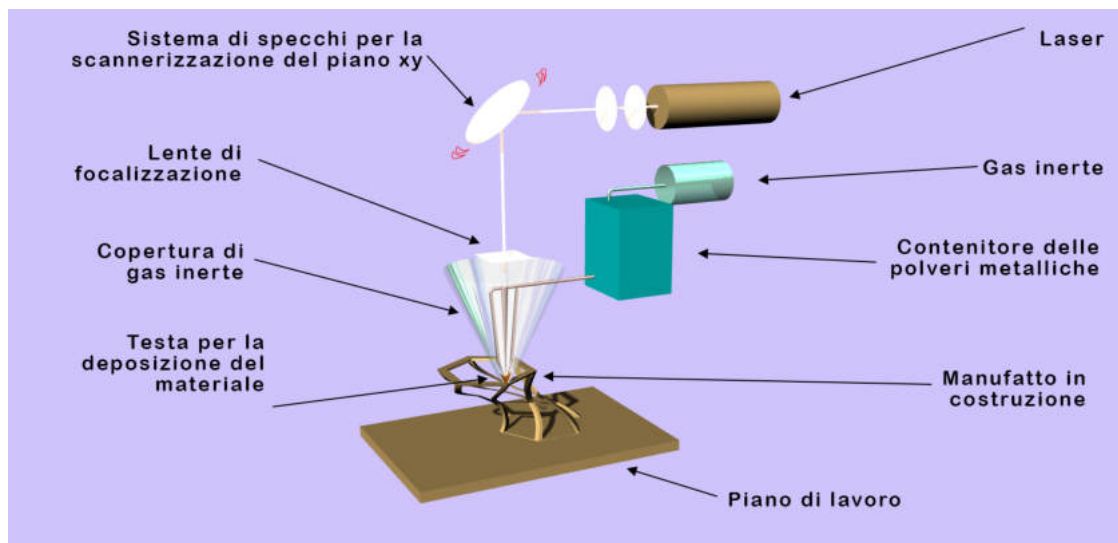


Figura 7: Schema del processo LENS®.

rugosità superficiali devono esser rimosse con un processo di rettifica. In caso di necessità si ricorre a lucidatura (*polishing*).

L'inconveniente di questa tecnologia è dovuto alle elevate tensioni residue dovute ai numerosi processi termici causati dai vari passaggi del laser e al veloce raffreddamento del pezzo. Questo può portare a distorsioni non volute.

0.5 Laminated Object Manufacturing

La *Laminated Object Manufacturing (LOM)* è stata sviluppata alla fine degli anni '80 dalla Helisys Inc di Michael Feygin negli USA. Anche in questo caso la creazione dell'oggetto segue l'iter consueto [59].

La LOM si serve di una lastra di materiale - in origine carta, poi laminato metallico oppure nastro ceramico - avvolta su di un rullo e ricoperta su uno oppure su entrambi i lati con un collante termoattivo. All'estremità opposta del macchinario si trova un altro rullo con la funzione di raccogliere il laminato residuo della lavorazione, Figura 8. Il sistema si compone inoltre di un rullo riscaldato, un impianto per la scansione laser del piano xy ed un piano mobile. La funzione del rullo

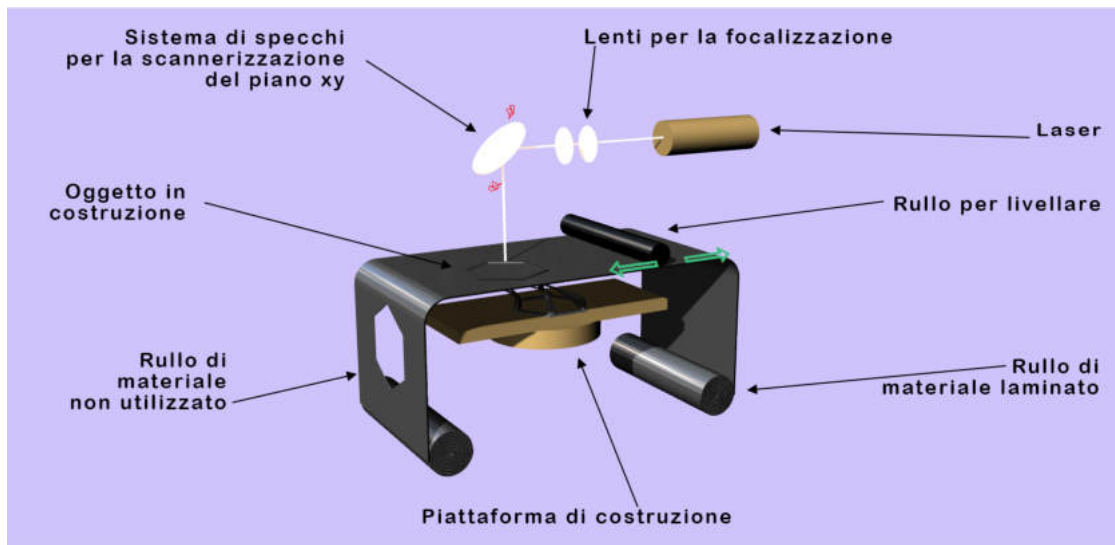


Figura 8: Schema del processo Laminated Object Manufacturing.

riscaldato consiste nel passare sul laminato e così attivare il collante in modo che la lamina aderisca al substrato precedente. Il laser taglia la lamina eseguendo le istruzioni del software che determina il contorno del manufatto in costruzione. È necessario calibrare la potenza del laser per evitare di incidere sui piani già realizzati. Per semplificare la rimozione del prodotto finito, il laser delimita il prototipo entro un rettangolo e alcuni piccoli cubi intorno ad esso. La procedura di rimozione è complessa ed occorrono appositi attrezzi e molto tempo per effettuarla correttamente. Il vantaggio di questa tecnologia è la mancanza di tensioni residue dovute a distorsioni interne nel prodotto finito; anche i costi sono contenuti e non è sempre necessario un processo di rifinitura superficiale del manufatto. Gli svantaggi consistono nel fatto che gli starti sono considerevoli e il prodotto non presenta una finitura superficiale soddisfacente [36, 54].

0.6 Wire-feed Technology

Le tecniche AM a filo metallico si possono suddividere in tre gruppi in base alla sorgente energetica impiegata: fascio di elettroni, arco elettrico, fascio laser. Il confronto tra manufatti ottenuti da processo a letto di polveri e processi a filo ha rilevato che la finitura superficiale degli oggetti creati con quest'ultima procedura è mediocre a causa delle tensioni che si generano: tutti i manufatti sono affetti dal cosiddetto effetto "a gradino". Per questo motivo tali verranno solo accennate [75].

Queste tecniche presentano comunque alcuni vantaggi, tra cui i costi contenuti, la velocità di produzione e la possibilità di generare facilmente oggetti anche voluminosi oppure degli FGM con fili di materiale diverso [77].

Le tecniche *Wire and Laser Additive Manufacturing (WLAM)* utilizzano essenzialmente un laser, un sistema automatico per il progresso del filo, un sistema per mantenere caldo il pezzo in lavorazione e un gas di protezione. Il laser fonde il filo e le gocce che si formano vanno a fissarsi al substrato. Per l'accrescimento del pezzo possono muoversi indifferentemente sia la testa del laser che il substrato.

Nelle tecniche WLAM le proprietà meccaniche dei manufatti dipendono dalla velocità con cui si effettua la saldatura, dalla potenza del laser, dalle caratteristiche del filo impiegato in termini di composizione chimica e diametro, dal suo orientamento e dalla velocità con cui avanza [75].

Tra i metodi che usano filo metallico annoveriamo il *Directed Energy Deposition (DED)* indicato anche con il termine *Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3)* che, a parte la sorgente impiegata, rassomiglia molto alla LENS.

La DED venne ideata nel 1999 dalla *Lockheed Martin* che fino al 2002 ne deteneva il diritto esclusivo. In tempi più recenti è stata studiata e migliorata dal centro di ricerca della *NASA* (NASA Langley Research Center negli Hampton, VA) che l'ha usata come base per creare strutture metalliche adatte all'uso nello spazio [43].

La NASA ha creato due diverse tecniche: una portatile a filo singolo per realizzare oggetti di dimensioni ridotte ma molto dettagliati; l'altra di qualità inferiore che utilizza due fili di materiale diverso per creare compositi [43].

Il filo metallico si usa anche nelle *Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)*, ovvero processi di riporto per saldatura che fanno accrescere il prodotto a partire da un substrato. A seconda della fonte energetica si possono suddividere in *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, *Plasma Arc Welding (PAW)* e *Gas Tungsten arc Welding (GTAW)* [75].

Le tecniche di saldatura della GTAW e della PAW sono piuttosto complesse, impiegano un elettrodo di tungsteno non consumabile e un filo consumabile difficilmente orientabile, per questo motivo questi processi necessitano di una pianificazione lunga e laboriosa.

Il processo di saldatura della GMAW consiste nel far scoccare un arco elettrico fra il pezzo in lavorazione ed un elettrodo consumabile perpendicolare al pezzo stesso. Diverse Università stanno studiando questi processi; ad esempio l'Università del Kentucky, quella di Nottingham e quella di Wollongong in Australia [75].

0.7 Selective Laser Sintering

La *Selective Laser Sintering (SLS)* nacque nel 1984 ad opera dall'Università del Texas, in seguito venne immessa sul mercato prima la *Sinterstation* della statunitense *DTM Corporation*, poi la *EOSint* dalla tedesca EOS [38].

La SLS impiega un laser per sinterizzare diversi tipi di materiale purché polverizzato, sono ottimi quelli metallici e quelli ceramici. Il laser di norma è alla stato solido oppure a CO₂ con lunghezza d'onda pari a 1.06 μm (infrarosso) e potenza compresa tra 50 ed 200 W. Oltre al laser in dotazione al macchinario sono presenti un sistema di controllo per la focalizzazione e l'orientamento del fascio (due specchi collegati a galvanometri di precisione e uno scanner ottico), due contenitori per le polveri e un rullo che le distribuisce uniformemente sul piano di lavoro senza pressarle. Tutta la procedura si esegue in una camera chiusa con azoto sotto pressione per ridurre al minimo la presenza di ossigeno che comporterebbe l'ossidazione dei manufatti in metallo.

Il processo necessita di una procedura di pre-riscaldamento che termina con il raggiungimento di una certa temperatura mantenuta poi stazionaria. Il valore di quest'ultima dipende dal tipo di materiale impiegato (più elevata è la temperatura di fusione, più alta sarà la temperatura da raggiungere). Raggiunta quella voluta, tramite un rullo si distribuisce uniformemente il materiale di consumo sulla piattaforma di costruzione; il laser agisce sul piano in conformità con il disegno CAD, infine con un pistone si abbassa la piattaforma. La procedura si ripete fino al termine del *job* Figura 10 [36, 73]. Le polveri, che dovranno avere buona

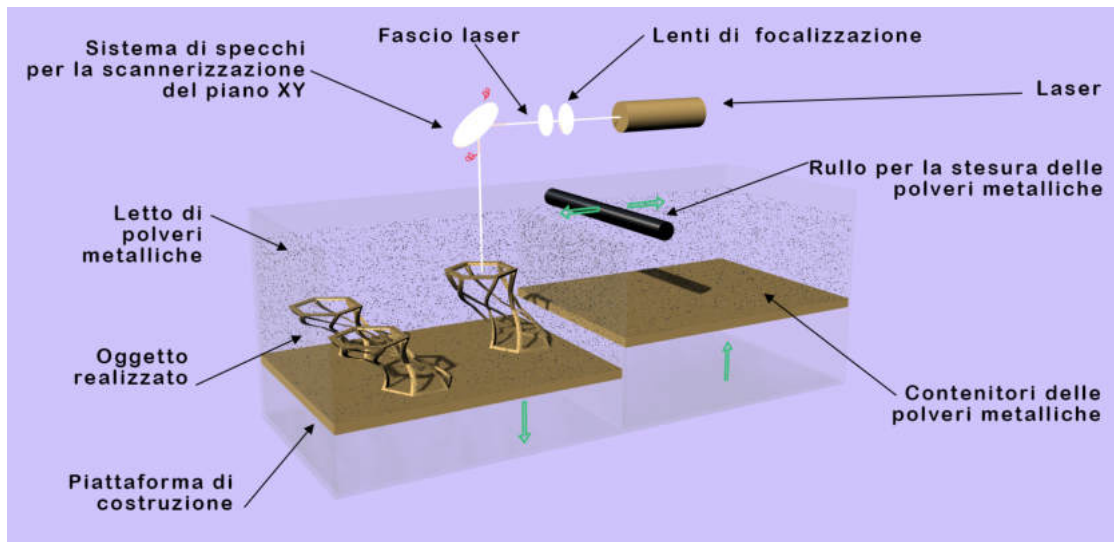


Figura 9: Schema della tecnologia SLS.

conducibilità termica e capacità termoplastiche, quando scansionate dal laser subiscono una fase di riscaldamento seguita da una di rapido raffreddamento. [36, 73].

In alcuni casi, per favorire il processo di lavorazione e diminuirne la potenza, si impiegano polimeri (per esempio metil-metacrilato) per ricoprire le polveri me-

talliche o quelle ceramiche. I polimeri dovranno essere rimossi a *job* completato (*debinding*).

Il manufatto finito può essere affetto da difetti quali porosità, scarsa finitura superficiale o distorsioni. Per eliminarli si dovranno effettuare processi post-produzione come la lucidatura (per ridurre la rugosità superficiale) o la pressatura isostatica a caldo (*Hot Isostatic Pressing - HIP*) per aumentarne la densità [73].

Tra i vantaggi che offre la SLS tecnica c'è la riciclabilità delle polveri. Queste possono re-impiegate anche 12 o 14 volte senza che i prodotti finiti ne risentano. Questa particolare caratteristica rende l'efficienza della SLS maggiore di quella dei processi Selective Laser Melting che verranno descritti di seguito.

Kruth *et al.* [74] hanno analizzato con minuzia i prodotti che si ottengono dalla lavorazione dei processi AM derivanti dalla sinterizzazione laser, specialmente quelli realizzati con le tecniche SLS, SLM e *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* descritta in uno dei prossimi paragrafi. I ricercatori hanno suddiviso queste tecnologie in base ai meccanismi di legame che nascono durante il processo di lavorazione. Le tecniche AM a letto di polveri sono state suddivise in diverse categorie: sinterizzazione allo stato solido *Solid State Sintering - SSS*, in fase liquida (fusione parziale) *liquid phase sintering (partial melting) - LPS* ed infine completa fusione *full melting - FM*. Nei processi SSS, il pezzo potrebbe si possono mostrare restringimenti dovuti a gradienti di temperatura generati durante processo [73, 74].

Delle ricerche sulle polveri di diverse leghe di titanio processate via SLS ed SLM svolte in collaborazione tra la *Baikov Institute of Metallurgy* in Russia, la *National Academy of Science* in Bielorussia e l'*Università di Lovanio* in Belgio [85] è risultato che a temperature molto inferiori a quella di fusione, l'unico meccanismo legante è la sinterizzazione allo stato solido, mentre se la temperatura di esercizio si mantiene al di sotto di quella di transizione tra le fasi α e β , il grado di sinterizzazione resta contenuto [74].

0.8 Selective Laser Melting

La tecnica *Selective Laser Melting (SLM)* è stata brevettata nel 1997 dalla *SLM Solutions Group AG* [166] e prevede la fusione totale del materiale tramite una sorgente laser [166].

In realtà da una ricerca condotta da Krut *et al.* [74] nel 2005 si evince che la fusione delle polveri è solo parziale e non totale, come avviene per il processo SLS.

Numerosi gruppi di ricercatori in tutto il mondo hanno ideato e sviluppato impianti con questo tipo di approccio, ad esempio Abe *et al.* [84] dell'Università di Osaka hanno ideato un macchinario dotato di due laser, uno a CO₂ ed uno Nd:YAG, per realizzare un prodotto non affetto da *balling*.

In Belgio i ricercatori dell'*Università di Lovanio* [79] hanno creato e migliorato negli anni una macchina con un solo laser Yb-YAG in fibra, e fornito di una macchina fotografica digitale che opera nella zona vicina all'infrarosso ad alta velocità e permette di catturare istantaneamente una parte dell'onda deflessa dalla zona fusa. L'interpretazione dell'immagine acquisita permette di studiare la geometria di quest'ultima zona. In Figura 10 possiamo osservare lo schema di funzionamento del processo SLM che è analogo al processo SLS, differisce per temperature di esercizio e potenza impiegata.

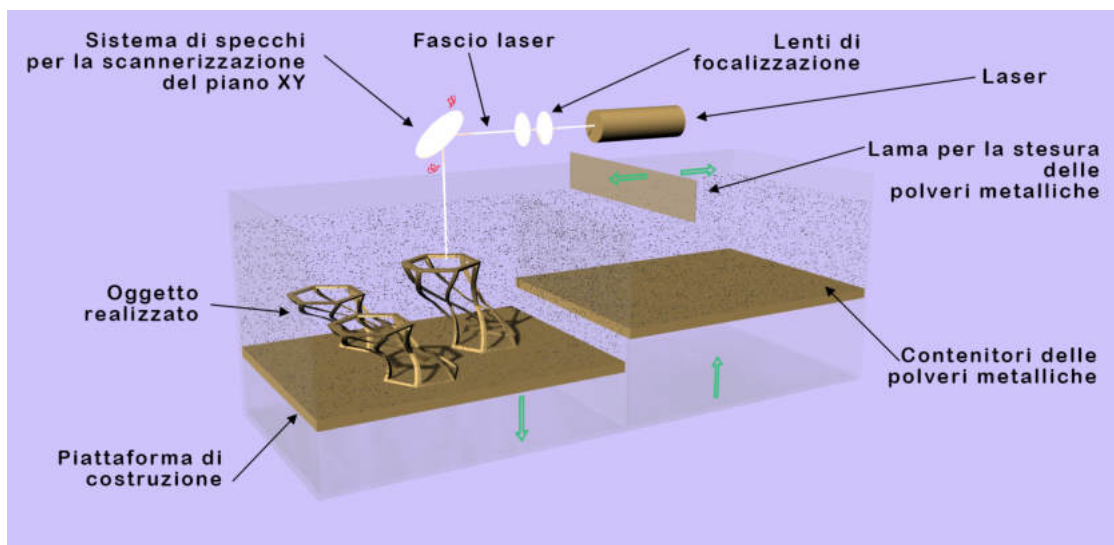


Figura 10: Procedimento Selective Laser Melting, schema generale.

Per impedire l'insorgere di ossidazioni e/o l'innescò di un incendio, nella camera di costruzione viene convogliato gas inerte, di solito argon o azoto. Per evitare difetti quali distorsioni o delaminazioni causate da gradienti termici, prima di avviare il processo, la piattaforma di costruzione della macchina viene pre-riscaldata. Così facendo si riduce la differenza di temperatura tra gli ultimi strati del manufatto e la sua base. Normalmente, prima di procedere alla creazione strato su strato dell'oggetto voluto, la macchina pre-riscalda la piattaforma di costruzione grazie ad un apposito sistema montato al suo interno. In questo modo si attenua la differenza di temperatura tra gli ultimi strati del pezzo e la base, evitando difettologie quali distorsioni o delaminazioni dovute proprio ai gradienti termici [39].

Questo tipo di tecnica richiede un tempo inferiore per realizzare il prodotto rispetto a quello necessario per la SLS [46]. I prodotti da SLM non sono privi di difetti, tra gli altri si osservano in genere porosità, fessurazioni, tensioni residue, finitura superficiale mediocre e presenza di sfere decoese [79, 46].

0.9 Direct ed Indirect Metal Laser Sintering

I processi AM che prevedono la sinterizzazione di polveri metalliche mediante laser possono esser suddivisi in due principali categorie: a sinterizzazione diretta e a sinterizzazione indiretta [92]. A prescindere, per entrambe le categorie, il macchinario utilizzato funziona in presenza di azoto (o altro gas inerte) ed in atmosfera protetta, con percentuale massima di ossigeno pari all'1%. Il letto di polveri viene steso con un rullo o una lama. Un laser agisce sulle particelle depositate sul piano seguendo il disegno CAD, poi il piano di lavoro si abbassa per permettere la stesura di un nuovo strato di polveri. Il tutto si ripete fino al completamento del *job*, Figure 11 e 10 [91, 92, 93].

La differenza principale tra le due procedure, secondo Dewidar *et al.* [92], che le hanno confrontate, consiste nella presenza o meno di un polimero che funge da legante, inoltre i manufatti da sinterizzazione indiretta necessitano di un trattamento post-produzione, mentre quelli da sinterizzazione diretta no. Da entrambi i metodi nascono prodotti con buona finitura superficiale ma caratteristiche meccaniche non ottimali.

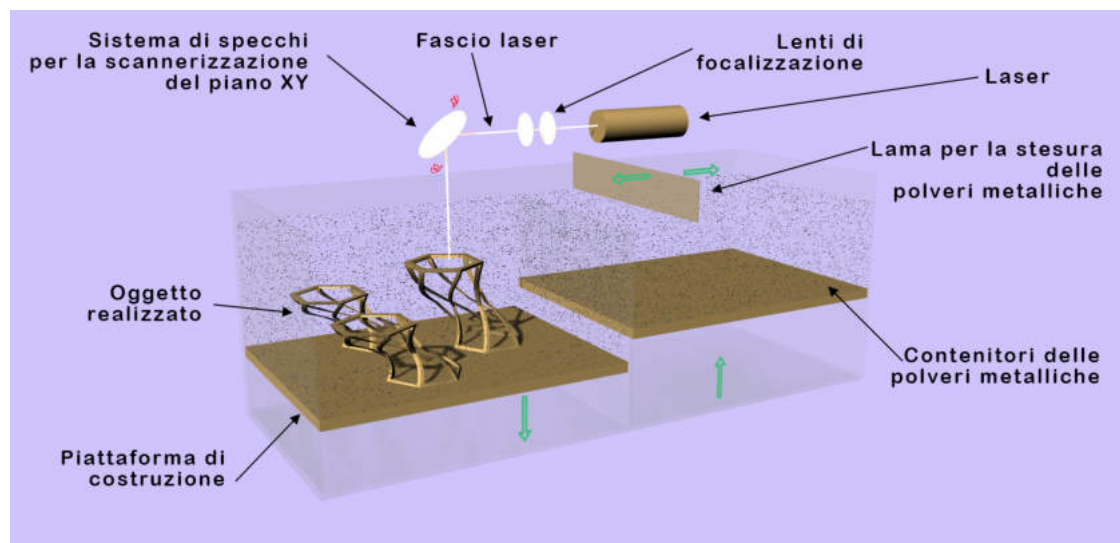


Figura 11: La tecnica Direct Metal Laser Sintering, schema generale.

Il primo processo a sinterizzazione diretta di polveri metalliche fu commercializzato dalla tedesca EOS GmbH con il nome commerciale di *Direct Metal Laser Sintering- DMLS*, Figura 11). Il termine "*Direct*" è dovuto al fatto che il pezzo densifica e perviene alla geometria voluta *direttamente* all'interno della macchina. I primi macchinari impiegavano una miscela di polveri di bronzo con diversa temperatura di fusione e diversa granulometria.

In origine si utilizzavano polveri di due materiali diversi: al passaggio del laser quelle a temperatura di fusione più bassa si scioglievano, le altre no, tuttavia la temperatura del liquido era tale da sinterizzarle per diffusione. Attualmente i macchinari DMLS sono in grado di lavorare polveri di un solo materiale, motivo per cui vengono definite ad un solo componente [93]. I macchinari DMLS oggi montano laser con potenze maggiori, in grado di fondere il materiale, ma l'appellativo DMLS è comunque stato mantenuto dalla EOS negli anni. In generale questa tecnologia viene anche indicata con il termine *Direct Metal Laser Melting* - DMLM per rimarcare la fusione completa delle polveri, oppure con il termine misto DMLS/DMLM [166].

Nella sinterizzazione diretta non si utilizzano leganti, si effettua una sinterizzazione allo stato solido del letto di polveri, Figura 11. L'energia del laser è tale da portare la temperatura del letto di polveri molto vicina al punto di fusione del metallo, ma senza superarlo [96, 93]. La temperatura è tale da far sì che le particelle di polveri vicine si uniscano generando a formare "colli", come già detto in precedenza per le tecniche SLS. Per evitare la formazione di grandi particelle sferiche e porosità, è necessario calibrare accuratamente lo spot e l'energia del laser [95].

Le tecniche a sinterizzazione indiretta impiegano polveri metalliche rivestite con un polimero che funge da legante, vengono per questo indicate come tecniche "*one component + polymer*". Quando il laser scansiona il letto di polveri il polimero fonde legando le particelle metalliche, si ottiene una '*green part*'. Le particelle metalliche hanno una temperatura di fusione molto maggiore di quella del polimero per cui in questo stadio il pezzo sarà affetto da una marcata porosità e densità scarsa. Per rendere il prodotto più denso, una volta ultimato, si effettua una lavorazione in forno articolata in tre fasi. Nella prima fase la *green part* è sottoposta ad una temperatura doppia di quella di fusione del polimero per rimuoverlo completamente. Nella seconda fase si aumenta la temperatura fino a portarla a quasi il doppio della precedente (comunque non deve essere raggiunta la temperatura di fusione del metallo). Il prodotto diventa uno scheletro poroso che potrebbe avere dimensioni minori di quelle volute a causa del lungo intervallo di tempo che intercorre tra le due fasi. Nella terza ed ultima fase si porta il pezzo alla temperatura di fusione di un agente infiltrante, per permetterne la penetrazione all'interno della struttura porosa per capillarità.

Un altro metodo di sinterizzazione indiretta è quello a due componenti. In questo caso si impiega una miscela di due polveri con granulometrie e temperature di fusione diverse. Quella con grani più piccoli e temperatura di fusione più bassa fonde per prima e agisce da legante con la seconda che, invece serve a dare struttura al pezzo. L'energia termica fornita dalla sorgente laser è tale da mantenere la temperatura compresa tra quelle di fusione delle due polveri, in questo modo è possibile infiltrare per capillarità un legante nelle porosità del manufatto, rendendo la struttura più compatta [93]. Occorre controllare l'energia erogata dal laser minuziosamente: se fosse troppo bassa si potrebbero riscontrare nel prodotto finito numerose porosità; se fosse troppo alta si formerebbe un eccesso di liquido e quindi delle distorsioni nel pezzo. Eventuali pori nel prodotto finito saranno rimossi grazie alla compressione dovuta alle forze capillari dell'infiltrante. Queste forze, tuttavia, potrebbero concorrere alla nascita di piccoli pori isolati. Potrebbero infatti

comprimere la parete che due porosità hanno in comune, questa si ripiegherebbe unendoli e creandone di nuovi con dimensioni ridotte [93].

Per farlo hanno creato numerosi campioni con diversa orientazione nello spazio (0° e 90° rispetto la piattaforma di costruzione), differenti spessori fra piani e con diverse velocità di scansione.

0.10 Electron Beam Melting

La tecnologia *Electron Beam Melting (EBM)* venne realizzata dalla *Arcam Corporation*. Fu la prima tecnologia AM ad impiegare un fascio di elettroni come sorgente per sinterizzare e/o fondere un letto di polveri metalliche. Grazie alle sue caratteristiche, questa tecnica venne impiegata in ambito aerospaziale quando nel 2008 la NASA realizzò delle giranti in lega di titanio per la Stazione Spaziale Internazionale [71]), ma anche in ambito biomedicale, sono infatti in via di studio protesi la sostituzione di ginocchia e tibie che utilizzano polveri di Ti-6Al-4V [72]).

Sebbene un raggio laser sia più preciso (può focalizzare una grande quantità di energia su una zona estremamente ristretta) rispetto ad un fascio di elettroni, quest'ultimo presenta un'efficienza energetica superiore, come si evince dal confronto delle caratteristiche delle due fonti energetiche in Tabella 3.

In Figura 12 si riporta uno schema rappresentativo di questo processo.

	Fascio di elettroni	Fascio Laser
Particelle del fascio	Elettroni	Fotoni
Lavorazione sotto vuoto	è necessaria	non è necessaria
Efficienza fornita	15-20%	2-5%
Densità di energia erogata	$>10^8[\text{W}/\text{mm}^2]$	$<10^6[\text{W}/\text{mm}^2]$

Tabella 3: Comparazione delle caratteristiche più importanti delle sorgenti a fascio di elettroni e laser.

La EBM per essere eseguita necessita di essere in condizioni di alto vuoto, per questo i manufatti che realizza non presentano ossidazione, inoltre mostrano una buona finitura superficiale [68]. Anche in questo caso per la realizzazione del pezzo deve essere seguito il consueto iter definito nell'Introduzione.

Il principio di funzionamento rassomiglia a quello di un Microscopio Elettronico a Scansione - SEM. Il fascio di elettroni viene generato all'interno di una colonna e per farlo agire correttamente sulla piano di polveri in costruzione, vengono fissate alla piattaforma due lenti magnetiche: la prima per definire il diametro del fuoco, la seconda per deflettere il fascio di elettroni e collimarlo correttamente, Figura 12 [69].

La piattaforma di costruzione deve essere pre-riscaldata, il fascio di elettroni scansiona diverse volte lo strato di polveri con potenza contenuta e velocità elevata. In un secondo tempo il fascio agirà con potenza elevata e velocità ridotta esclusivamente nella zona definita dal modello CAD. Così facendo la polvere viene sinterizzata e fissata, prima di essere fusa. Con questa tecnica le tensioni residue sono ridotte poiché tra le diverse scansioni il gradiente di temperatura diminuisce,

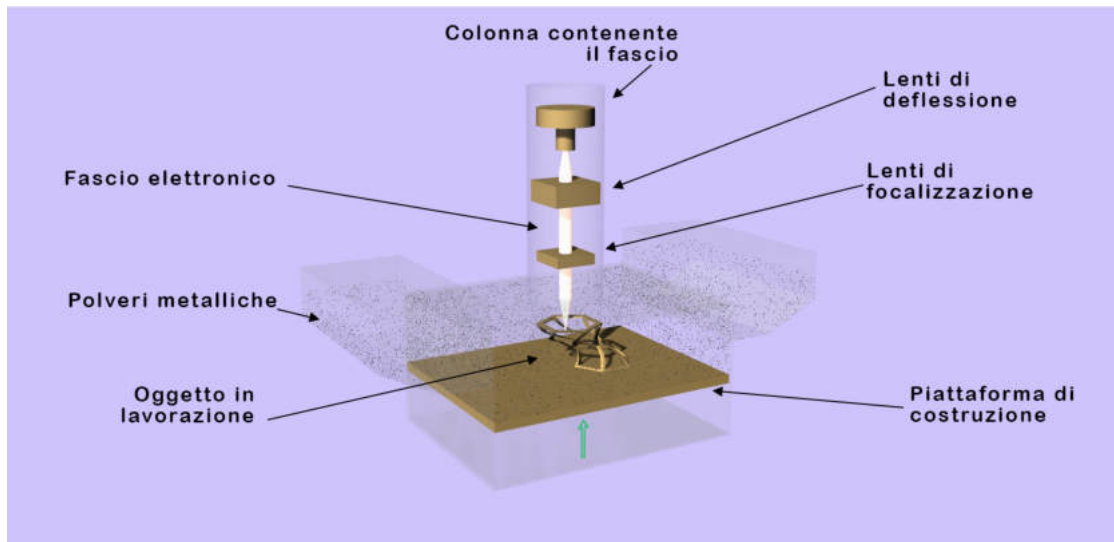


Figura 12: Schema generale della Electron Beam Melting.

questo riduce la nascita di deformazioni. Tuttavia se durante la lavorazione la potenza del fascio di elettroni varia notevolmente, sul manufatto si possono riscontrare le cosiddette *"build tripping"*: ovvero delle zone più o meno estese di polveri parzialmente fuse o non sinterizzate che deteriorano le caratteristiche meccaniche del prodotto [72].

Per evitare l'insorgere di di cariche elettriche, durante il processo di fusione, si inietta un gas inerte nella camera di processo. La presenza del gas inerte favorisce il processo di raffreddamento che segue la fase di fusione. Il processo segue il normale iter di lavorazione, descritto nell'Introduzione. Una volta estratto, il manufatto verrà ripulito dalle polveri non utilizzate, poi si lascerà a raffreddare a temperatura ambiente.

0.11 Ultrasonic Consolidation

La *Ultrasonic Consolidation (UC)* non è attualmente molto praticata; impiega anch'essa laminati metallici di spessore micrometrico (titanio, rame o alluminio). Appartiene alle tecniche AM a stato solido anche se in realtà è una tecnologia ibrida perché il macchinario al suo interno contiene una macchina a controllo numerico (*Computer Numerical Control - CNC*) con tre assi che serve per eliminare il materiale superfluo e migliorare la geometria dell'oggetto in produzione. Poiché non avviene nessuna fusione, il prodotto finito non presenta tensioni residue e non è soggetto a contrazioni o distorsioni, Figura 13 [46, 81, 83]. La UC usa gli ultrasuoni come sorgente, perciò non necessita di energie elevate ma solo di una corretta pressione [46].

Per creare il manufatto inizialmente si stende un foglio di laminato sulla piattaforma e lo si ricopre di materiale adesivo; in un secondo tempo si aggiunge un secondo foglio. Con il sonodroto si saldano i due strati. Di seguito con un laser o con uno specifico coltello si ricava la forma voluta e si rimuove dalla piattaforma di

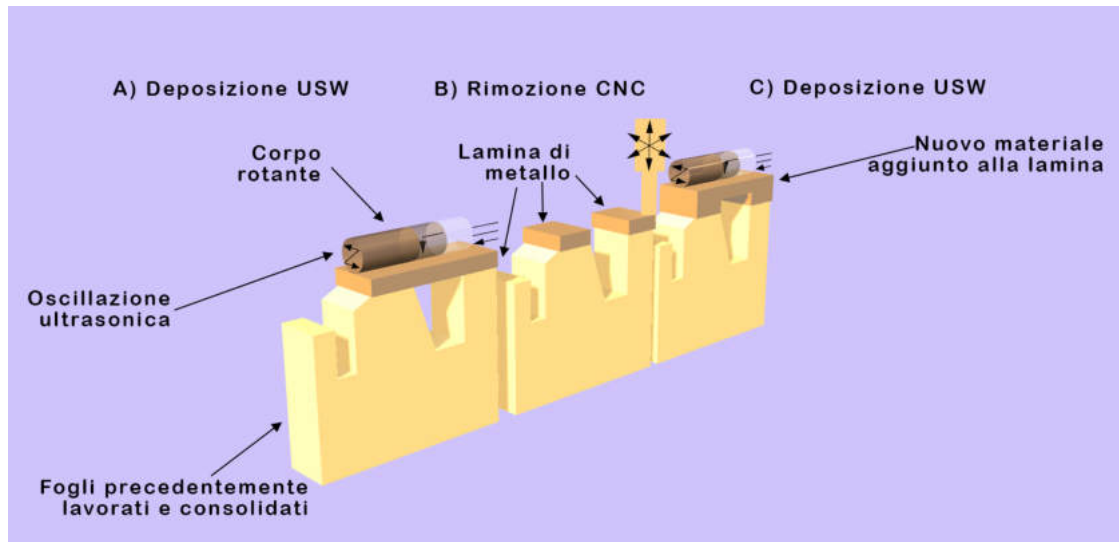


Figura 13: Evoluzione del processo UAM.

costruzione. È però necessario rimuovere il materiale non utile con un processo di fresatura post-lavorazione [46].

La Ultrasonic Consolidation ha la possibilità di integrare sensori, fibre ottiche o addirittura circuiti elettrici, direttamente nel prodotto in lavorazione, caratteristica unica per un processo AM [46, 83]. Tra gli altri *Janaki Ram et al.* [83] hanno realizzato con la UC strutture a gradiente funzionale (FGMs), sovrapponendo laminati metallici di diverso tipo [46], mentre *Kong e Soar* [82] hanno inserito tre diversi tipi di fibra ottica nella matrice fruttando la lavorazione "a freddo" di questa procedura.

Influenza dei parametri di processo sul prodotto finito

Le tecniche AM sono numerose e sono diversi e numerosi anche i materiali di consumo (polveri, fili, laminati metallici); è quindi impossibile annoverarli tutti. Si fa riferimento all'articolo di *Utela et al.* [87] per una rassegna dei diversi tipi di materiali adottabili nei processi SFF e delle loro caratteristiche.

Nel prosieguo si riportano alcune informazioni generali sulle tecniche più utilizzate: la SLM e la DMLS.

I macchinari AM a letto di polvere che usano un laser come sorgente possono, variando alcuni parametri della sorgente, migliorare le proprietà meccaniche e la qualità superficiale del prodotto finito.

Si può per esempio agire sulla focalizzazione del laser variando il diametro dello spot. Questo influisce particolarmente nell'elaborazione dei bordi e del contorno del manufatto [79].

Si possono ottenere prodotti con densità diverse agendo sulla combinazione di tre parametri: potenza erogata, velocità di scansione e distanza tra una scansione e l'altra (*hatch spacing*). Essi influiscono infatti sulla densità di energia che il macchinario eroga al letto di polveri. L'energia per unità di volume E_ρ è calcolabile attraverso la relazione [79, 88, 89, 90]:

$$E_\rho = \frac{P}{\nu st} \quad \left[\frac{J}{mm^3} \right] \quad (1)$$

dove con P si indica la potenza attiva del fascio [W], con ν la sua velocità di scansione [mm/s], con s l'interlinea tra due passate e con t lo spessore dello strato. Se si fa riferimento all'unità di energia per superficie scansionata si avrà:

$$E_\rho = \frac{P}{\nu s} \quad \left[\frac{J}{mm^2} \right]. \quad (2)$$

I parametri t ed s sono evidenziati in Figura 14, mentre nella Figura 15 vengono mostrati alcuni esempi di strategie di scansione del laser sul letto di polveri. La densità di energia aumenta con l'aumentare della potenza attiva del fascio laser e diminuisce con l'aumentare della velocità del fascio, oppure se aumenta la distanza tra passate o se aumenta la distanza tra piani successivi.

Krut et al. [86] hanno riscontrato che anche le strategie di scansione del raggio laser influiscono sulle proprietà del manufatto avviando uno studio su provini generati via SLM con polveri metalliche differenti. Dai risultati ottenuti si evince che le strategie di scansione influiscono sulla finitura superficiale, sulla densità, sulle

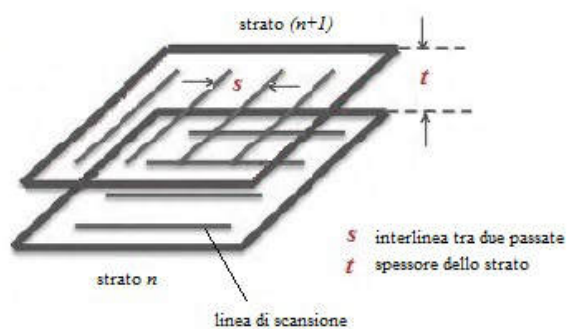


Figura 14: I parametri su cui agire per modificare le strategie di movimentazione del laser. Cortesia I.I.S.

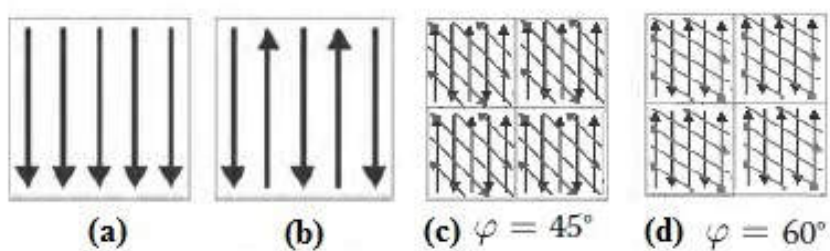


Figura 15: Alcuni esempi di direzioni adottabili per la scansione del raggio del laser: (a) monodirezionale, (b) bidirezionale, (c) e (d) bidirezionale a scacchiera con diverso angolo di inclinazione φ . Cortesia I.I.S.

proprietà meccaniche tensionali, sulla microstruttura e sulle tensioni residue dei manufatti.

0.12 Influenza dei parametri di processo sulla finitura superficiale

I manufatti generati con processi SLM ed SLS presentano una finitura superficiale non elevata: nel caso dei prodotti in acciaio inossidabile tipo 316L, nello stato "as built" di solito la rugosità corrisponde a $R_a = 13\mu\text{m}$ ed $R_z = 80\mu\text{m}$. Ma tale finitura è migliorabile, tramite varie tecniche che possono essere termiche (plasma spray), chimiche (etching) o anche meccaniche (sabbiatura). Nel caso della SLM si può praticare un re-melting superficiale prima di togliere il prodotto dal macchinario [86].

Calignano *et al.* [94] hanno analizzato come i parametri di processo influenzino la rugosità superficiale di manufatti in lega di alluminio, prodotti con la DMLS; se si sottopone il prodotto finito ad un processo di pallinatura (balling) con sfere di vetro ad una pressione di 8 bar si riscontra un notevole miglioramento della qualità superficiale.

Perché la qualità superficiale del manufatto sia buona, la densità elevata e le caratteristiche meccaniche buone, la distribuzione della granulometria delle polveri e le loro proprietà sono di grande importanza [98, 142]: esse devono essere fini (distribuzione granulometrica tra 10 e 60 μm), in modo che il laser le sciogla più efficacemente.

La qualità superficiale del manufatto è influenzata anche dalla distanza tra i piani depositati (tipicamente tra 20 e 100 μm) e tra una scansione e la successiva. Badrosamay *et al.* [101], hanno notato che per ogni specifica distanza tra le passate del laser la rugosità superficiale corrisponde a un certo e caratteristico valore; non si modifica comunque la dipendenza generale dalla granulometria delle polveri.

Se si desidera ottenere un allungamento percentuale a rottura elevato, simile a quello ottenuto con i processi convenzionali, è assolutamente consigliabile utilizzare particelle di grandi dimensioni rispetto alla distanza o allo spessore tra i piani [98]. Nel caso in cui si decida di impiegare una polvere composta da particelle con diversa granulometria per migliorare sia la forza meccanica, sia la densità del prodotto finito, sia la qualità superficiale, la massa di particelle con dimensioni maggiori deve essere minore di quella di particelle più fini. È stato constatato da Spiering *et al.* [98] che la distribuzione delle polveri procurate da alcuni produttori a volte non risulta appropriata per i processi additivi.

Anche l'eventuale presenza di supporti ha un'influenza sulla qualità superficiale [183]. Essi possono essere indispensabili se il prodotto è stato progettato con zone di diverso spessore o per alcuni orientamenti di accrescimento del pezzo. In quest'ultimo caso i supporti servono a impedire le deformazioni di origine termica.

0.13 Influenza dei parametri di processo sulla densità e sulle proprietà meccaniche

Con i processi Solid Free-form Fabrication si desiderano ottenere prodotti con la densità più elevata possibile; dipendono infatti da essa le proprietà meccaniche del prodotto stesso. Per quanto riguarda i prodotti 3DP, essa ad ogni modo è piuttosto elevata, in alcuni casi addirittura superiore a quella dei manufatti tradizionali; occorre tenere presente a questo proposito che in processi come l'SLM o l'SLS il prodotto non viene sottoposto ad elevate pressioni meccaniche come avviene in alcuni processi tradizionali, come ad esempio lo stampaggio, perché nasce e cresce all'interno della camera di processo [86].

L'energia fornita dalla sorgente laser e la qualità della polvere impiegata influenzano sia sulla porosità che sulla microstruttura del manufatto; la porosità, a sua volta, incide sulla densità e sulle proprietà meccaniche del prodotto [49].

I difetti principali che condizionano le proprietà meccaniche sono le tensioni residue - causate dalle elevate velocità di raffreddamento e dai gradienti di temperatura - e la grande porosità che caratterizza tutti i prodotti da additive, a prescindere dal tipo di tecnica utilizzata.

Per limitare le tensioni residue è possibile mantenere la temperatura della camera di processo il più vicina possibile a quella di fusione del metallo utilizzato e effettuare trattamenti termici post-lavorazione [141].

0.13.1 Porosità e densità

L'elevata porosità invece non è attualmente eliminabile: essa deriva principalmente dall'evaporazione, da difetti causati dal processo di lavorazione, da zone non completamente sature di polvere (che possono nascere quando si effettua una nuova deposizione) o ancora da impurità delle polveri [141].

Anche le caratteristiche della polvere utilizzata influiscono sulla densità del prodotto, in quanto se hanno caratteristiche non uniformi potrebbero non essere fuse dal laser in modo omogeneo e il piano solidificato potrebbe presentare regioni leggermente concave ed altre leggermente convesse [49, 86, 87]. Tutti i prodotti AM (o *Direct Manufacturing* - DM) sono affetti da porosità oppure da zone in cui la fusione (*Lack of Fusion*- LoF) non si è verificata correttamente; questo avviene quando l'energia fornita dal laser è scarsa.

Liu et al. [143] ha suddiviso le porosità in tre diverse categorie; esse determinano eventuali cricche di fatica; per ridurle, occorre migliorare la polvere utilizzata, la potenza erogata dal laser e la velocità di raffreddamento [142, 143]; *Fang et al.* [138, 139] hanno dimostrato che minore è la velocità di raffreddamento, maggiori sono le dimensioni dei pori.

Anche l'uso della pressatura isostatica a caldo, eseguito post-lavorazione, agisce sulle porosità residue, migliorandone la rugosità superficiale, la microstruttura, aumentando la duttilità del prodotto e la sua resistenza a fatica (influenzata anche da eventuali inclusioni presenti nel manufatto). La pressatura isostatica a caldo, però può influire su altre caratteristiche strutturali, inclusa la struttura dei grani

[49, 141, 142].

Si possono generare delle lacune di piccole dimensioni e con sforma sferica a causa del gas di copertura intrappolato tra la fase di fusione e la successiva rapida fase di solidificazione, oppure a causa di una rifusione parziale dello strato sottostante o ancora a causa della mancanza di materiale fuso in alcune aree [154].

0.13.2 Ossidazioni

Per evitare ossidazioni dovute a contaminazioni da ossigeno ed azoto normalmente si satura di argon la camera di processo. Non è sicuro comunque che lo stesso gas inerte non agisca sul prodotto provocandone l'ossidazione. Benché questo sia un problema di grande rilievo, attualmente non si trovano riscontri in letteratura a questo proposito [106]. Invece secondo *Lucas et al.* [142] il gas di protezione potrebbe non influenzare la creazione di porosità; una delle cause più probabili potrebbe essere l'intrappolamento del gas nelle particelle di polvere utilizzate.

Delle eventuali inclusioni presenti nel manufatto possono influire sulle prestazioni del pezzo, in particolare sulla resistenza a fatica [142].

Per scongiurare contaminazioni da ossigeno ed azoto, normalmente la camera di processo viene saturata con argon. Quest'ultimo si potrebbe incapsulare nelle porosità presenti nel pezzo rendendo difficoltosa la loro rimozione. Nonostante questo rappresenti un problema estremamente importante, in particolare se il pezzo è sottoposto a carichi ciclici, attualmente non si trovano riscontri in letteratura a tal proposito [141]. Secondo il gruppo di *Lucas et al.* [142], per la comunità scientifica il gas di copertura non influisce sulla creazione di pori, al contrario una delle cause più probabili secondo loro potrebbe essere l'intrappolamento del gas nelle polveri del materiale di consumo. Secondo loro anche il rimescolamento del fuso causato dall'effetto Marangoni potrebbe contribuire alla creazione di porosità.

Nelle tecniche DED (*Direct Energy Deposition*) l'elevata portata della polvere può far diminuire l'energia specifica della zona fusa; questo comporta un aumento di gas intrappolato nel manufatto [142].

0.13.3 Influenza delle materie prime impiegate

Le materie prime adottate influenzano la densità del prodotto finito con riferimento alla forma, alla distribuzione delle polveri e alla dimensione. Le particelle con superficie sferica liscia hanno maggiore scorrevolezza e possono quindi migliorare la deposizione dei nuovi strati di polvere. Inoltre polveri fini portano ad un prodotto finito più denso: questo comporta migliori proprietà meccaniche, un aumento della conduttività termica e quindi un incremento della velocità di solidificazione; ciò consente di ottenere microstrutture fini [79].

Le polveri utilizzate nei processi *DM* sono prodotte con metodi di atomizzazione che impiegano gas [154]; possono quindi contenerne alcuni atomi a causa della rapida solidificazione che devono sopportare. Tali inclusioni possono essere la causa della presenza di lacune sferiche di dimensioni notevoli nei manufatti AM, perché il gas può favorire l'aggregazione dei pori. Questi difetti non si possono evitare

poiché non dipendono dal macchinario AM, ma dal processo di fabbricazione della materia.

0.13.4 Microfratture

Iebba et al. [153] hanno analizzato le porosità riscontrate in due diversi processi DM, l'EBM e il SLS, per valutare se, a parità di polvere impiegata, una sorgente diversa influenzi il tipo di porosità. Con entrambe le tecnologie di costruzione, sono state riscontrate particelle di polvere non fuse all'interno del manufatto, vuoti, cavità sia grandi che piccole. Queste ultime sono causate da uno scarso trasferimento di energia verso il letto di polveri. Per ovviare al problema occorre scegliere accuratamente le caratteristiche e la forma della polvere impiegata.

Le microfratture che si osservano tra i piani probabilmente sono dovute a tensioni termiche residue dovute al rapido raffreddamento dello strato superficiale [154]. In un prodotto da SLM le microfratture tra due piani (in cima oppure in fondo a due singoli strati) si verificano quando la parte superiore e la parte inferiore del profilo sono sollecitate a forte trazione, mentre la parte centrale è sollecitata a compressione.

A questo proposito, *Leuders et al.* [141] hanno riscontrato che lo sviluppo delle cricche negli elaborati da SLM si può ridurre con appositi processi post-lavorazione, come la HIP ad alta temperatura. Anche l'effetto *balling* determina la formazione di microvuoti: quando lo strato di polvere viene colpito dal laser, la traccia delle scansioni risulta discontinua e si possono formare appunto delle aree porose ed irregolari, affette, appunto, da *balling*. Questo difetto influenza negativamente anche il nuovo strato superficiale e le successive scansioni, in particolare se la velocità è elevata; si possono creare dei vuoti difficili da eliminare [154].

0.13.5 Influenza della fonte energetica impiegata

Iebba et al. [153] ha notato che non esistono differenze apprezzabili tra prodotti realizzati via SLM e mediante EBM in relazione alla morfologia ed alle dimensioni dei difetti, perciò che la sorgente sia un raggio laser o un fascio di elettroni non fa differenza.

La densità è influenzata anche dai parametri del fascio laser incidente (potenza, dimensioni del fascio, velocità con cui il raggio scansiona il letto di polvere, distanza tra i piani scansionati, tipo di strategie adottate) [86].

I prodotti finiti ottenuti con il processo di sinterizzazione diretta di polveri metalliche (DMLS) presentano densità elevate e proprietà meccaniche molto simili a quelle che si ottengono con i processi convenzionali. Tuttavia anche questo tipo di DM, per vari motivi (elevati gradienti di temperatura, tensioni interne, rischio che si creino zone con avvallamenti o dossi) può determinare una qualità superficiale non ottimale. Anche la rugosità superficiale può essere un fattore critico in diversi campi di applicazione, specialmente per evitare la rottura del manufatto a causa di cricche superficiali [94].

I ricercatori dell'Università di Lovanio [86] hanno analizzato l'influenza che le strategie adottate per movimentare il raggio del laser hanno sulla densità del prodotto finito. Hanno compreso che con una velocità di scansione ridotta, indipendentemente dallo spessore tra i piani, si ottengono densità elevate, e viceversa. I ricercatori del Leuven [79, 97] hanno notato in particolare che a elevate potenze e basse velocità (sorgente laser Yb-YAG in fibra, lunghezza d'onda $\simeq 1070$ nm, velocità di scansione ν 200 mm/s, potenza 200 W) si osserva la formazione di un *keyhole* come nella saldatura laser tradizionale.

Osservando il passaggio di una singola scansione del laser si può prevedere la forma della zona fusa, valutare l'adesione del piano con quello sottostante e capire se vi sono interruzioni o irregolarità nel processo. La quantità di energia impiegata per la scansione deve essere opportunamente calcolata tramite le eq.ni (2) e (1) per evitare temperature troppo elevate [79].

0.13.6 Proprietà meccaniche

Riguardo alle proprietà meccaniche dei prodotti realizzati con le tecniche SLS, SLM e DMLS devono ancora essere approfonditi alcuni aspetti, ad esempio la correlazione con la microstruttura o le prove di fatica. In generale però tali proprietà sono paragonabili a quelle dei prodotti ottenuti con le classiche lavorazioni, tranne la tenacità che nei prodotti freeform fabrication risulta inferiore [86]. Quest'ultima è in stretta relazione con la segregazione a bordo grano e la composizione chimica delle polveri.

Delle ricerche condotte in Belgio, presso l'Università di Lovanio, su numerosi campioni generati via SLM e sottoposti a prova Charpy è risultato che l'asse di costruzione dei manufatti non influisce sulla tenacità del pezzo finito se la connessione tra strati successivi è sufficientemente buona e non sono presenti porosità [86, 100].

È ormai ampiamente riconosciuta l'influenza che hanno sulle caratteristiche meccaniche [74, 98, 99] l'orientazione del manufatto e anche la distribuzione delle polveri (*Spierings et al.*) [98].

Nei processi PBF i parametri di produzione hanno un forte influsso sulle proprietà dei materiali, possono indurre stress termici o aumentare la porosità dei manufatti. Per migliorare le proprietà meccaniche e della struttura è quindi fondamentale poter monitorare il processo di produzione per rilevare e prevedere i difetti di fabbricazione e agire di conseguenza [49].

Quando si progetta e si realizza un manufatto si devono quindi considerare alcune semplici regole: evitare la produzione di volumi considerevoli, perché aumenta il costo e possono svilupparsi tensioni residue, anche molto rilevanti, nel prodotto; orientare l'oggetto in modo da contenere il numero di supporti; nelle zone dove l'oggetto presenta degli angoli acuti, che sono concentratori delle tensioni, è necessario generare supporti filiformi [183].

0.13.7 Altre influenze

Anche la strategia con cui il laser scansiona il letto di polvere è di grande rilievo. La tecnica migliore è quella di scansionarlo con percorsi bidirezionali, stendendo il nuovo letto e ruotando il laser prima di riavviare la nuova scansione [86]. Anche il modo con cui viene distribuita la polvere dalla lama sul piano di lavoro può avere un'importanza. Secondo *D. Wang et al.* [103] lo spessore dello strato di polvere depositata dalla lama e lo spessore del piano scansionato dal laser sono in stretto rapporto. A questo proposito influisce anche la geometria del recoater (un rullo o una lama) [102, 103].

Norme tecniche sulla manifattura additiva e prove per il controllo della qualità

0.14 Norme tecniche

Nonostante siano presenti sul mercato da più di vent'anni, le tecnologie additive sono ancora oggi in via di sviluppo e perfezionamento.

Dal 2011 l'*International Organization for Standardization (ISO) Technical Committee 261 on Additive Manufacturing* e l'*American Society for Testing and Materials (ASTM) - Committee F42 on Additive Manufacturing* collaborano per realizzare delle linee guida comuni in questo campo. Grazie a questa cooperazione sono nati i primi due dispositivi comuni, cioè la *ASTM F2915-11* [158] (sostituita nel 2013 dalla *ISO/ASTM 52915: 2013 E* [159] poi revisionata nel 2016) e la *ASTM F2921-11* [155] (sostituita nel 2013 dalla *ISO/ASTM 52921: 2013*, [157]). Lo scopo di questa collaborazione è quello delle norme internazionali comuni per ottimizzare le risorse delle compagnie operanti nel settore oltre che degli utilizzatori finali [156].

La collaborazione tra questi due enti nasce dall'esigenza di sviluppare e integrare congiuntamente norme tecniche per le procedure SFF, a cominciare dalla terminologia, per far sì che l'identificazione dei numerosi e vari procedimenti sia immediata in qualunque Paese [166].

Anche il *Technical Committee 438* dell'*European Committee for Standardization - (CEN)* si è aggregato in questa collaborazione nel 2015. L'obiettivo comune è di realizzare delle linee guida universali su temi differenti come la nomenclatura, le materie prime impiegate e le loro caratteristiche, le apparecchiature, gli standard da seguire per verificare la qualità dei manufatti realizzati [160].

A questo scopo sono stati sviluppati numerosi progetti, tra gli altri il *Mega-fit* [161] ed il *SASAM* [161] che interessano e coinvolgono gli enti preposti alla realizzazione delle normative internazionali.

Lo standard per la terminologia AM/ISO 52900:2015 [167] è stato redatto con il contributo di diversi e numerosi esperti del settore appartenenti ai comitati tecnici ISO/TC 261 ed ASTM F42, è stata approvata come riferimento anche dall'europeo CEN/TC 438. È perciò uno dei rari standard approvati congiuntamente da tutti e tre i comitati [166]. Di seguito l'elenco delle norme tecniche pubblicate già ed attualmente in via di preparazione, suddivise per argomento. Le norme ASTM attualmente in vigore sono state diversificate in base alla *terminologia*, ai *materiali*

ed ai processi, alla progettazione, ed alle metodologie di test.

In base alla *terminologia*:

- ISO / ASTM52900 - 15 *Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology.*

In base ai *materiali ed ai processi*:

- F2924 - 14 *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion;*
- F3001 - 14 *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion;*
- F3049 - 14 *Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes;*
- F3055 - 14a *Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion;*
- F3056 - 14e1 *Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion;*
- F3091 / F3091M - 14 *Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials;*
- F3184 - 16 *Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion;*
- F3187 - 16 *Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals;*
- F3213 - 17 *Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum via Powder Bed Fusion;*
- F3301 - 18a *Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion;*
- F3302 - 18 *Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Titanium Alloys via Powder Bed Fusion;*
- F3303 - 18 *Standard for Additive Manufacturing – Process Characteristics and Performance: Practice for Metal Powder Bed Fusion Process to Meet Critical Applications;*
- F3318 - 18 *Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Specification for AlSi10Mg with Powder Bed Fusion – Laser Beam;*
- ISO / ASTM52901 - 16 *Standard Guide for Additive Manufacturing – General Principles – Requirements for Purchased AM Parts.*

In base alla *progettazione*:

- ISO / ASTM52915 - 16 *Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2*;
- ISO / ASTM52910 - 18 *Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations*.

In base alle *metodologie di test*:

- F2971 - 13 *Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing*;
- F3122 - 14 *Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes*;
- ISO / ASTM52921 - 13 *Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies*.

L'ASTM ha redatto un elenco degli standard per immagini tridimensionali da utilizzare nelle tecniche additive, raggruppandole in base all'*interoperabilità per lo scambio dei dati*, alla *terminologia*, alle *linee guida*, ed ai *metodi di prova*. In base all'*interoperabilità per lo scambio dei dati*:

- E2807 - 11(2019) *Standard Specification for 3D Imaging Data Exchange, Version 1.0*.

In base alla *terminologia*:

- E2544 - 11a(2019) *Standard Terminology for Three-Dimensional (3D) Imaging Systems*.

In base alle *linee guida*:

- E2641 - 09(2017) *Standard Practice for Best Practices for Safe Application of 3D Imaging Technology*.

In base ai *metodi di prova*:

- E2919 - 14 *Standard Test Method for Evaluating the Performance of Systems that Measure Static, Six Degrees of Freedom (6DOF), Pose*;
- E2938 - 15 *Standard Test Method for Evaluating the Relative-Range Measurement Performance of 3D Imaging Systems in the Medium Range*;
- E3064 - 16 *Standard Test Method for Evaluating the Performance of Optical Tracking Systems that Measure Six Degrees of Freedom (6DOF) Pose*;
- E3124 - 17 *Standard Test Method for Measuring System Latency Performance of Optical Tracking Systems that Measure Six Degrees of Freedom (6DOF) Pose*;

- E3125 - 17 *Standard Test Method for Evaluating the Point-to-Point Distance Measurement Performance of Spherical Coordinate 3D Imaging Systems in the Medium Range.*

Infine elenchiamo le normative in via di perfezionamento per la pubblicazione di nuove regole comuni:

- 19/30375492 DC (ISO/ASTM 52942) *Additive manufacturing. Qualification principles. Qualifying machine operators of metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications;*
- 19/30375489 DC (EN ISO/ASTM 52941) *Additive manufacturing. System performance and reliability. Standard test method for acceptance of powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application;*
- 19/30354915 DC (ISO 14649-17) *Industrial automation systems and integration. Physical device control. Data model for computerized numerical controllers. Part 17. Process data for additive manufacturing;*
- 18/30383436 DC (EN ISO/ASTM 52903-2) *Additive manufacturing. Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials. Part 2. Process. Equipment;*
- 18/30377646 DC (EN ISO/ASTM 52900) *Additive manufacturing. General principles. Terminology;*
- 18/30371669 DC (EN ISO/ASTM 52902) *Additive manufacturing. Test artefacts. Standard guideline for geometric capability assessment of additive manufacturing systems;*
- 18/30364185 DC (ISO/ASTM 52907) *Additive manufacturing. Technical specifications on metal powders;*
- 16/30338304 DC (ISO/ASTM 52903-1) *Additive Manufacturing. Standard Specification for Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials. Part 1. Feedstock materials;*
- ASTM WK47031 *New Guide for Nondestructive Testing of Metal Additively Manufactured Metal Aerospace Parts After Build.*

Data la rapida evoluzione delle tecniche SFF, in particolare per elaborati metallici, riuscire ad avere standard specifici consentirebbe di velocizzare e rendere più sicure le certificazioni dei prodotti AM [107]. Tuttavia bisogna considerare che gli elaborati da *additive* mostrano anomalie intrinseche come la presenza di porosità, le inclusioni non metalliche e le zone con assenza di fusione che non possono essere sottovalutate. Di solito, per certificare la qualità dei prodotti generati con le lavorazioni classiche, si sottopongono alcuni campioni sia a test distruttivi che non. *Seifi et al.* [107] propongono di valutare un approccio probabilistico per stimare la tolleranza con cui accettare le diverse difettologie, in termini di tipologia, numero di occorrenze e dimensioni. Gli autori propongono di definire delle curve limite per

le diverse classi di materiali, ma anche per i diversi difetti intrinseci ed le diverse tecniche AM per usarle come informazione aggiuntiva, anche se probabilista, per lo studio della meccanica della frattura. Uno degli approcci proposti per la realizzazione di queste curve è la valutazione della distribuzione delle dimensioni reali dei difetti. Le valutazioni devono tenere sempre in considerazione, oltre al tipo di materiale base impiegato e alle sue peculiarità, le possibili anomalie ed il campo d'impiego a cui il manufatto è destinato (aeronautica, biomedica, ecc.). Nello stesso articolo, si fa riferimento alle considerazioni tecniche iniziali e ai vigenti standard individuati per i test, sia non distruttivi che distruttivi, proposti dalla ASTM nella F3122-14 [132]. Sono presenti alcune considerazioni sui controlli ed i trattamenti post-produzione che possono essere impiegati, a seconda del settore in cui verrà utilizzato il manufatto da realizzare; infine vengono commentati e riassunti i punti salienti emersi in recenti congressi. Ad esempio quello tenuto nel settembre del 2015 a Dayton, OH, U.S.A., organizzato in collaborazione dalla *Federal Aviation Administration* (FAA) e dalla *Air Force Research Laboratory* (AFRL) con l'intento di sviluppare metodi di certificazione specifici per le tecniche SFF.

La EN ISO 17296-3:2016 [104] detta i principi generali per i metodi di test, per le prove sui manufatti, per le caratteristiche principali ed interessa i fornitori di materie prime, che devono rispettare alcune specifiche; i costruttori dei dispositivi AM in relazione allo sviluppo e alla corretta realizzazione dei macchinari AM; ai certificatori che con test appositi valutano la conformità dei pezzi realizzati. In realtà la norma non si riferisce a test specifici per l'additive, i test sono gli stessi a cui vengono sottoposti i prodotti generati con le usuali tecniche.

In America i manufatti da AM possono essere sottoposti a numerose prove, la più generica è norma la ASTM-F3122 [132] che rimanda sempre alle procedure standard per la certificazione di prodotti da manifattura classica. In generale non esiste una procedura per la certificazione di prodotti da additive, sono i costruttori dei macchinari ad avere l'onere di proporre percorsi per la qualificazione dei prodotti AM da sottoporre all'approvazione degli enti certificatori designati, soprattutto in quegli ambiti fortemente regolamentati, come il campo aeronautico [105, 106, 107].

0.15 I controlli non distruttivi per le AM

Attualmente i controlli non distruttivi per la manifattura additiva vengono trattati nella norma EN ISO 17296-3:2016 [104] e nella ASTM F3122. Essi consistono nell'ispezione con i liquidi penetranti, nell'esame radiografico, nella tomografia computerizzata e nel test ad ultrasuoni. Le analisi dei difetti rilevabili attraverso tecniche non distruttive (in seguito NDT) che si effettuano normalmente sui manufatti realizzati con le consuete metodologie di fabbricazione, potrebbero non essere applicabili in ambito AM, come fa notare la NASA [111, 112]

Attraverso metodi NDT si possono valutare le porosità o alcune caratteristiche interne di manufatti che presentano geometrie complesse e talvolta inaccessibili [112].

Di consueto per validare i risultati delle ispezioni effettuate con controlli non distruttivi, si eseguono molteplici prove. Ad esempio il team di Lopez [115] ha sottoposto un certo numero di manufatti a numerose radiografie e, per una validazione più esaustiva dei risultati ottenuti, i campioni sono stati sottoposti anche ad ultrasuoni.

Strantz et al [118] hanno effettuato diverse prove non distruttive (radiografie, liquidi penetranti, correnti indotte ed altri ancora) su manufatti ottenuti con due diverse materie prime (il Ti6Al4V e la AISI 316L), generati con due tecniche additive (il riporto di saldatura laser utilizzato come tecnica additiva, anche nota come Laser Metal Deposition (LMD) e la SLM).

Nel 2014 la NASA ha proposto alla comunità scientifica di aderire ad un'organizzazione di consenso volontario, la (*Voluntary Consensus Organization - VCO*), per sviluppare un insieme di standard per controlli NDT a cui sottoporre i prodotti da additive, in collaborazione con i comitati E07 (*Nondestructive Testing*) ed F42 (*Additive Manufacturing Technologies*) dell'ASTM [111]. Esperti sia in campo SFF che in campo NDT provenienti dall'industria, dal mondo accademico o dalle agenzie governative americane saranno così in grado di sviluppare in sinergia standard specifici per le applicazioni spaziali. A tal proposito è in via di sviluppo la normativa ASTM WK47031 *New Guide for Nondestructive Testing of Additively Manufactured Parts Used in Aerospace Applications*.

I metodi di controllo NDT evolvono rapidamente come le diverse tecniche AM. Tali metodi si rivelano versatili perché contribuiscono a migliorare sia le caratteristiche dei prodotti finiti, sia lo sviluppo di modelli per l'ottimizzazione del processo produttivo [112].

Le tecniche NDT vengono impiegate per rilevare dimensioni e orientamento delle difettologie da sottoporre a valutazione di stabilità tramite l'applicazione della teoria della meccanica della frattura per identificare i difetti critici. Tuttavia i difetti nei manufatti AM spesso non sono facilmente rilevabili con le usuali tecniche NDT. Essi potrebbero presentare dimensioni e distribuzioni inusuali, o addirittura mostrare difettologie mai riscontrate prima e per questo non riconducibili ai modelli tradizionali in uso per questo scopo. La NASA [111] attualmente impiega la meccanica della frattura adottando dimensioni e orientamenti dei difetti critici proposti da un software sviluppato per prodotti da manifattura classica. Questo criterio potrebbe rivelarsi non adeguato per i manufatti AM. Sebbene con grande

difficoltà, è in via di sviluppo una metodologia adeguata.

0.15.1 Liquidi penetranti

I ricercatori della NASA *Waller et al.* [111] sostengono che i prodotti generati mediante tecniche additive, mostrano elevati livelli di porosità superficiali se messi a confronto con i manufatti realizzati con metodi convenzionali, per questo motivo anche le tradizionali tecniche non distruttive, per rilevare i difetti superficiali, perdono di efficacia sulle superfici scabrose dei manufatti AM. In particolare secondo gli autori i test effettuati con liquidi penetranti non sono adatti per ispezionare i prodotti SFF che non sono stati sottoposti a processi post-lavorazione di lucidatura.

Il team di *Draper* [133] ha impiegato, senza successo, l'analisi con i liquidi penetranti per rilevare la presenza di difetti superficiali sui campioni generati mediante processo EBM. Le uniche informazioni valide ricavate riguardano i supporti, che di norma vengono rimossi. Anche in questo caso, come per la NASA, il test non si è rivelato utile.

Il gruppo di *Lopez* [115] ha usato questo metodo per convalidare i risultati di un esame radiografico per rilevare di zone con mancanza di fusione - Lof.

0.15.2 Radiografia

Le radiografie si possono impiegare raggi x oppure i più penetranti raggi γ . La valutazione radiografica permette di riscontrare diverse difettologie come le mancanze di fusione, le porosità e le inclusioni anche di piccole dimensioni. Non è attualmente possibile la rilevazione di piccoli difetti planari e perpendicolari alla direzione di incidenza della radiazione. Per rilevare difetti è opportuno perciò effettuare diverse e numerose radiografie, possibilmente modificando l'angolazione[115].

0.15.3 Tomografia computerizzata

La tomografia computerizzata a raggi X (anche indicata con XCT o μ CT) è uno dei metodi di controllo non distruttivo [105, 110, 111].

La tecnica consiste nell'eseguire scansioni radiografiche in un oggetto attorno ad un asse di rotazione. Una volta acquisite, le immagini, vengono elaborate mediante un software specifico che costruisce un modello tridimensionale dell'oggetto indagato e del suo interno [110]. Tra le tecniche NDT, questo particolare metodo di ispezione si rivela estremamente adeguato per i manufatti da lavorazione additiva che possono presentare geometrie estremamente complesse (strutture trabecolari).

La tomografia computerizzata può essere impiegata, non solo come metodologia di controllo, ma anche in *reverse engineering* come metodo per la creazione del progetto del manufatto da sviluppare con tecnologie AM; per questo motivo è molto utilizzata in campo medico e biomedicale. Le prime versioni di XCT si svilupparono negli anni '90, proprio in ambito medico, per la realizzazione di protesi [110].

I tomografi negli anni si sono evoluti e modificati, aumentando di volta in volta la qualità dei dati registrati, la velocità di scansione e quella di elaborazione.

Un'altra applicazione del tomografo è quella di monitorare i processi in esecuzione. Questo modo d'impiego si rivela particolarmente vantaggioso in campo

aerospaziale. *Zenzinger et al.* [117] hanno impiegato un tomografo durante l'esecuzione di un manufatto via processo SLM, per documentare e stimare la qualità della coesione tra strati successivi, analizzando la variazione della radiazione rilevata. Così facendo è possibile generare un modello tridimensionale completo del manufatto in via di sviluppo. In particolare possono essere rimarcati punti critici della lavorazione quali zone decoese o non completamente fuse [105, 117].

Come evidenziato dal team di *Waller* [111], l'XCT è particolarmente utile per l'esame di manufatti con struttura interna non accessibile, oppure nel caso questi mostrino geometrie complesse. La tomografia computerizzata è utile anche per confermare o meno l'efficacia di eventuali trattamenti post-produzione.

Questa tecnica presenta qualche limite nella rilevazione dei difetti, in particolare per i manufatti metallici AM. Se l'oggetto sotto esame è molto denso, i raggi x faticano a penetrarlo, occorre aumentare il periodo di esposizione per rilevare un contrasto accettabile. Talvolta è oggetto di interesse solo una parte del manufatto, in questo caso, è possibile scansionare esclusivamente la zona voluta per stimare le eventuali criticità del pezzo.

Tra gli svantaggi che presenta la tomografia, è d'obbligo annoverare i tempi, comunque lunghi, necessari sia per l'acquisizione dei dati sia per la loro interpretazione. La XCT non rileva eventuali difetti se questi sono orientati perpendicolarmente al fascio [110, 111].

0.15.4 Ultrasuoni

L'ispezione con il metodo ad ultrasuoni è una tecnica di controllo NDT che permette di ricavare informazioni sulla struttura interna di un oggetto. Questo tipo di ispezione fonda le basi sui fenomeni di propagazione delle onde nei corpi solidi, nei liquidi e nei gas. Le onde sonore hanno frequenze molto maggiori di quelle udibili dall'orecchio umano (gamma di frequenze rilevate dall'uomo: $1 \div 20\text{kHz}$; per gli ultrasuoni $100\text{k} \div 15\text{MHz}$). Gli ultrasuoni sono originati da cristalli piezoelettrici sottoposti all'azione di un appropriato campo elettrico. Una volta generate, le onde vengono indirizzate verso il pezzo da ispezionare che, in base alla sua morfologia, può assorbirle, rifletterle oppure deviarle. Per fare in modo che l'onda sonora venga trasferita al materiale con una appropriata pressione acustica, è necessario far sì che la superficie di contatto della sonda ed il pezzo da ispezionare, sia convenientemente levigata. Inoltre tra la sonda e il manufatto deve essere presente un opportuno mezzo accoppiante, capace di trasferire il suono senza assorbirlo troppo. La velocità di propagazione dell'onda, invece, dipende dal materiale da testare. In linea di principio, questo tipo di ispezione sfrutta il fenomeno dell'eco che viene captato da un rilevatore. Il segnale di ritorno viene quindi filtrato e visualizzato sullo schermo di un opportuno apparecchio, rendendo così possibile l'osservazione degli echi di fondo; ovvero la parte di confine del mezzo esaminato e gli echi riflessi da potenziali difetti interni; più o meno attenuati in base alla forma, orientamento e dimensione delle difettologie presenti nel materiale in via di ispezione. Dall'analisi degli echi di ritorno si riesce a stimare la dimensione della difettologia urtata dal fascio ultrasonico grazie alla comparazione tra il comportamento dell'eco ricevuto e quello di riflettori standard (intagli, fori fiancali (SDH), fori a fondo piatto (FBH)) [114].

Con gli ultrasuoni è possibile misurare lo spessore del pezzo in osservazione o la dimensione e la distanza dei difetti che può avere. Generalmente agli ultrasuoni vengono impiegati sul prodotto finito, *Lopez et al.* [115] lo hanno adoperato in modo insolito. Lo hanno infatti collocato sul retro di una piastra di costruzione per manufatti in AM. Mentre il pezzo era in via di realizzazione venivano effettuare, in contemporanea, delle scansioni radiografiche e degli esami ultrasonici. Questi ultimi sono serviti per validare i risultati ottenuti con il controllo radiografico.

Anche *Rieder et al.* [116] della *MTU Aero Engines* hanno usato lo stesso metodo per monitorare in tempo reale il processo di produzione di alcuni prototipi, a geometria non complessa, da impiegare in aeronautica. Il gruppo di ricercatori ha installato un sistema di monitoraggio ad ultrasuoni a quattro canali all'interno di sei M280 della tedesca EOS. Il team di ricercatori ha utilizzato l'analisi istantanea dello spettro di Fourier (FFT) dei segnali acquisiti per rilevare la formazione di difetti, quali porosità e distorsioni. Questo metodo di impiego permette di rilevare informazioni importanti circa all'andamento del processo di fusione del pezzo in lavorazione.

L'uso di sonde ad ultrasuoni per l'ispezione istantanea del processo di lavorazione è stato impiegato anche da *Everton et al.* [137]. Il team in questo caso ha valutato i risultati ottenuti da un apparato *Laser Ultrasonic Test* - (LTU) per rilevare i difetti, sia interni che superficiali, di manufatti metallici ottenuti con processi *Laser-Based Powder Bed Fusion* - LPBF. Il loro scopo era duplice: individuare eventuali imperfezioni e monitorare a distanza la lavorazione *in situ* nei processi AM. La possibilità di osservare e controllare istantaneamente il *job* in lavorazione consentirebbe di ridurre i costi, lo spreco di materiale base e gli scarti di lavorazione. Inoltre permetterebbe di valutare l'adozione di strategie diverse per migliorare la qualità del prodotto finito. Per agire in tempo reale sul prodotto in lavorazione i tempi di risposta sono essenziali, purtroppo il sistema si è rivelato efficiente ma ancora piuttosto lento per essere performante *in situ*.

0.16 I controlli distruttivi per le AM

Nel 2016 si è tenuto in Sud America, precisamente in Texas a San Antonio, un *workshop* organizzato dal *NIST/ASTM* dal titolo *Mechanical Behavior of Additive Manufacturing Components* [119]. A questo seminario, centrato sulle caratteristiche dei manufatti da AM e sull'importanza che esse rivestono, hanno partecipato più di 150 esperti del settore provenienti dalle Università, dalle più importanti aree dell'industria e dai principali enti di normazione [107]. Questo congresso nasce dalla necessità di stabilire una strada comune da percorrere per giungere ad un insieme di norme standard, a livello internazionale, necessarie per la qualificazione e certificazione degli elaborati da *additive*. Sono stati analizzati lo stato dell'arte dei diversi tipi di processo AM, le proprietà e i difetti rilevati nei manufatti nonché le loro particolari geometrie, le differenti tipologie di ispezione praticate e i risultati a cui sono pervenute. Quest'ultimo tema è tra i più rilevanti: occorre infatti agire di comune accordo per stabilire quali prove di resistenza a fatica e a frattura ha senso praticare sui manufatti da *additive* [107, 119]. È prioritaria e condivisa da tutti partecipanti a questo summit, l'urgenza di studiare strategie e norme condivise per

una veloce e puntuale certificazione dei componenti realizzati con processi AM, in particolare per quelle che sviluppano e producono manufatti metallici.

Alcune tra le prove distruttive presenti nelle norme dall'americana ASTM [132] potrebbero risultare inefficaci; per rispettare gli standard spesso è necessario che il campione da validare abbia dimensioni e geometrie specifiche. Le tecniche di manifattura additiva sono invece studiate per realizzare manufatti con geometrie peculiari, come le strutture trabecolari oppure le FGMs, su tali campioni non possono essere applicati gli usuali standard. Per questo motivo è condivisa della necessità impellente di adeguare le norme generali, ed eventualmente crearne di nuove, per adattare alle particolari geometrie ottenibili da processi additivi [107].

I manufatti metallici realizzati con tecniche SFF possono presentare, in alcuni casi, proprietà meccaniche superiori rispetto ai prodotti ottenuti con le consuete metodologie [105, 107, 133, 134], tuttavia i difetti derivanti dai processi additivi possono incidere negativamente sul loro comportamento a fatica.

Le prove meccaniche e microstrutturali suggerite dagli standard attualmente in uso sono molto numerose e diversificate. Nel seguito vedremo un esempio di prova di trazione svolta in collaborazione con l'I.I.S. su dei saggi prelevati da un blocco di Inconel-625 generato via DMLS con la EOS M290 presso l'Istituto.

Su campioni dello stesso materiale abbiamo svolto anche indagini microstrutturali. I risultati di queste analisi sono stati poi confrontati con altri presenti in letteratura.

Alcuni metodi per la creazione di polveri metalliche

Si annoverano numerose e differenti tecniche per la creazione delle polveri metalliche, tutte prevedono un processo di atomizzazione. Ne proporremo solo alcune brevemente [60, 63, 62]. Il metallo (oppure una lega metallica) viene fuso in atmosfera protetta in presenza di gas inerte: argon, elio o azoto. Normalmente si cerca di contenere la presenza di ossigeno entro le 100 ppm. Il metallo da polverizzare viene fuso in un crogiuolo. Grazie ad un sistema di controllo viene poi inviato verso un ugello dove viene forzato un gas ad alta velocità (tipicamente si invia argon o azoto) che nebulizza il metallo fuso. Le gocce che si ricavano sono guidate verso un collettore di raccolta dove arriveranno solidificate. Generalmente le polveri sono sferiche ed omogenee con diametro che può variare tra i 50 ed i 100 μm [62]. Ci si riferisce a questa tecnica con il termine di *atomizzazione in gas*. Questa tecnica può essere ulteriormente suddivisa in due tipologie, "*external mixing*" o "*internal mixing*", in base al tipo di geometria dell'ugello, alla temperatura di fusione e al tipo di contatto tra gas e materiale fuso. Normalmente si adotta l'*internal mixing* se il materiale è in fase liquida a temperatura ambiente.

L'atomizzazione in gas, in generale, si usa principalmente per polverizzare leghe di ferro, nichel e cromo; ma anche per leghe di titanio e alluminio.

Figura 16). Tra i metodi di atomizzazione citiamo anche il *Drum Splat Process*

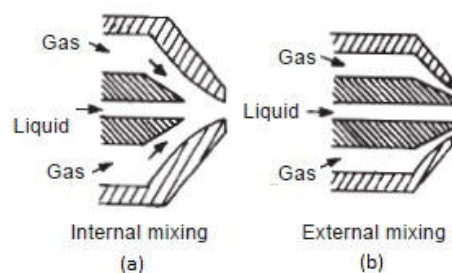


Figura 16: Metodi di atomizzazione: a) *internal mixing*, b) "*external mixing*". Cortesia I.I.S.

che viene impiegato prevalentemente per atomizzare l'alluminio, ma in linea di principio è valido per qualunque tipo di metallo. Da un ugello fuoriesce un gas che agisce sulla periferia di un tamburo posto in rotazione contenente del metallo fuso. Così facendo si generano delle "scaglie" o "fiocchi" di metallo (diametro massimo di 3 mm, spessore massimo di 100 μm) che solidificano velocemente poiché sono

poste a contatto con un substrato freddo. Tuttavia questo metodo non può essere eseguito a flusso continuo e i fiocchi sono difficili da intercettare [62].

Esistono numerose varianti del processo di *Atomizzazione Centrifuga*. Tutte impiegano del metallo fuso convogliato in un meccanismo a disco che ruota ad alta velocità. Grazie alla forza centrifuga, le gocce di metallo liquido fluiscono secondo una traiettoria tangenziale, solidificando in volo. La materia base può essere fusa in diversi modi: si possono fondere elettrodi mediante un arco al plasma (*PREP*), con arco elettrico (*Rotating Electrode Process* - *REP*) o tramite laser (*LREP*); comunque il processo si svolge sotto vuoto oppure in atmosfera protettiva con gas inerte, in quest'ultimo caso normalmente vengono impiegati argon o elio [62].

Il processo *Rapid Solidification Rate* - *RSR*, usato di norma per leghe di nichel e alluminio, adotta un atomizzatore centrifugo, cioè un disco concavo e poco profondo posto in rotazione con velocità superiore a 35000 giri al minuto. Il metallo fuso contenuto in un crogiuolo viene convogliato verso il disco mediante un ugello apposito. Per effetto della forza centrifuga il metallo atomizza in volo ad alta velocità; le particelle di metallo (polveri) vanno poi a coprire una barriera di elio costruita ad hoc. Le polveri che si raccolgono hanno forma sferica e un diametro compreso tra 25 e 89 μm .

Un'altra tecnica di uso comune è la così detta *atomizzazione al plasma*. Essa prevede l'impiego di un filo di lega metallica, ma può essere usato anche un elettrodo, inserito in una torcia al plasma. Il metallo viene fuso da un arco al plasma o da un arco elettrico e convogliato verso un substrato freddo per la sua solidificazione. Di fatto le polveri solidificano su strati sovrapposti. Tra i sottili strati di polveri si potrebbe innescare un processo di ricottura dovuto all'uso dei gas ad elevata temperatura. Per ovviare al problema si impiega un ulteriore getto di gas inerte che li allontana dal substrato. Le polveri che si producono con questa tecnica sono di qualità molto elevata e dimensioni inferiori a 200 μm [62].

Concludiamo questa breve panoramica sulle tecniche per la creazione di polveri metalliche con il processo di atomizzazione idraulica centrifuga (*Centrifugal Hydraulic Atomization*) in atmosfera gassosa [61]. Un sottile spessore di metallo fuso è atomizzato mediante un gas inerte che lo colpisce ad alta velocità. Attraverso un ugello, il materiale, viene convogliato verso una camera di turbolenza. Quando viene raggiunto un livello di pressione sufficiente, il materiale viene fatto passare entro un altro ugello con un foro cilindrico di modeste dimensioni. Il metallo fuso che fuoriesce ad una distanza di 10-15 mm dall'ultimo ugello solidifica in sfere e viene raccolto.

Una breve ma esaustiva trattazione sull'argomento è stata elaborata da *Herzog et al.* [140], a cui si rinvia per approfondimenti.

Prove sperimentali su lega di nichel

0.17 Materiali e metodi

Presso l'*Istituto Italiano della Saldatura* sono stati realizzati alcuni provini in Inconel-625 con il fine di avviare una campagna di controlli con metodi non distruttivi a cui ho preso parte.

Questa lega è molto utilizzata nell'ambito industriale [4] per le sue ben note caratteristiche: l'elevata resistenza all'ossidazione, alla corrosione, alle alte temperature, all'usura e la notevole tolleranza agli stress, sia meccanici sia termici. L'Inconel-625 non è tuttavia specificatamente indicato per lavorazioni realizzate con tecniche convenzionali, al contrario le tecniche SFF, in particolare la DMLM, consentono di realizzare prodotti più adatti all'inserimento in campo industriale.

I campioni sono stati generati mediante la M290 della EOS. La granulometria delle polveri, secondo il datasheet della casa madre è compresa tra $35 \pm 6 \mu\text{m}$ [70], motivo per cui la distanza tra i piani impostata dalle strategie di azione del laser (ovvero un pacchetto software specifico per polveri in Inconel-625 venduto dalla EOS) per la M290 è stabilita in $40 \mu\text{m}$.

0.18 La EOS M290: procedure per la realizzazione di manufatti

I manufatti in Inconel-625 sono stati generati DMLS con la EOS M290, Figura 17 presso l'Istituto Italiano della Saldatura (IIS). I manufatti in titanio grado 2 sono stati realizzati con la stessa macchina, ma presso la EOS.

Il macchinario è composto da una camera di costruzione a quattro assi: la lama o *recoater* per stendere il letto delle polveri metalliche; il dispenser che le contiene; la piattaforma di costruzione ed il vano di trabocco per raccogliere parte delle polveri stese e non sinterizzate, Figura 18. È corredato da un sistema per far affluire gas inerte (argon o azoto) all'interno della camera di processo e da un sistema filtrante a circolazione d'aria per l'eliminazione del gas e delle polveri che si sollevano durante la lavorazione, che verranno poi convogliate ad un opportuno contenitore. L'impiego di gas inerte rende più sicura la lavorazione meccanica della macchina prevenendo incendi ed esplosioni ed evita l'ossidazione dei manufatti. La M290 è dotata di un laser itterbio (Yb) in fibra ottica per la sinterizzazione delle polveri metalliche, di potenza nominale 400 W e di lunghezza d'onda compresa tra 1060 e 1100 nm. Sono presenti un apparato per la guida del raggio laser sul

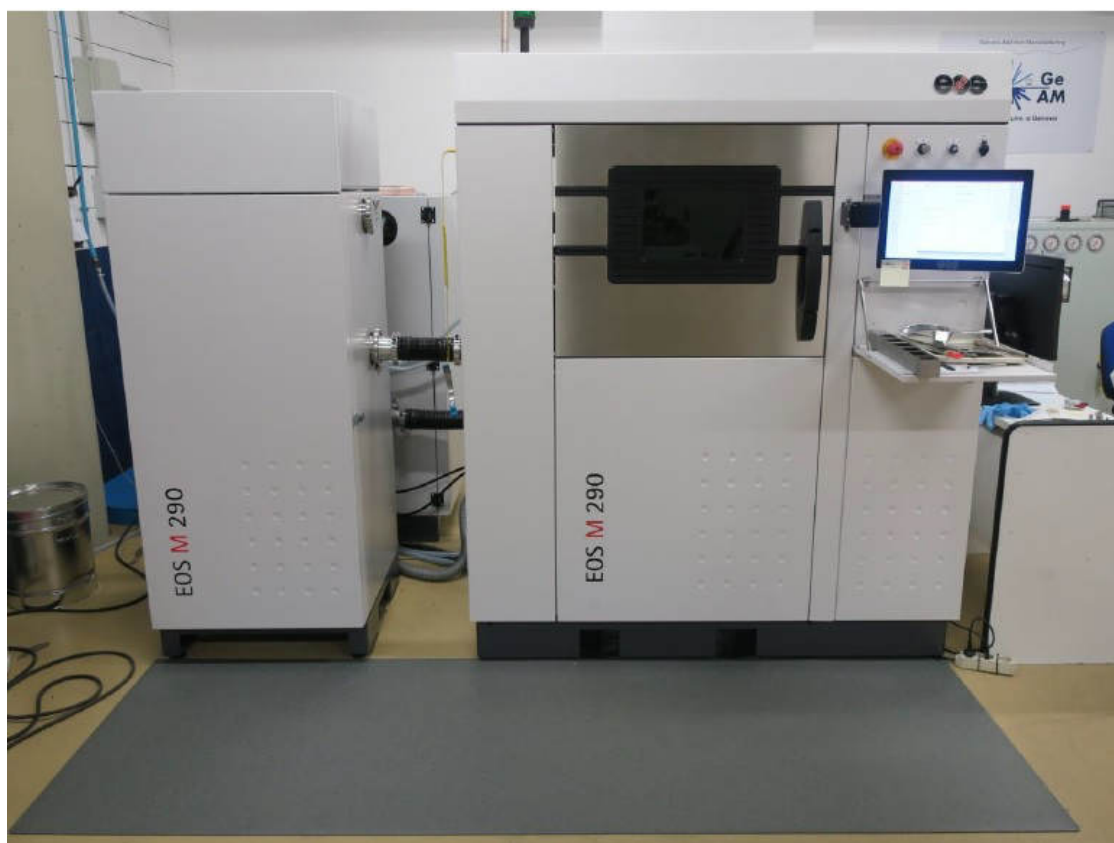


Figura 17: Macchina EOS M290 in dotazione presso l'Istituto Italiano di Saldatura.

piano di lavoro (formato da un sistema ottico di espansione con obiettivo a lente F-Theta per la messa a fuoco del raggio) e uno scanner galvanometrico di precisione a compensazione di temperatura per guidare il raggio laser sul piano di lavoro. Lo scanner è corredato da due specchi comandati ciascuno da un galvanometro dedicato e da un sistema di autocalibrazione integrato. Quest'ultimo controlla istantaneamente la posizione dei due specchi e li coordina, evitando un errato posizionamento del raggio laser sul piano di lavoro e prevenendo distorsioni nel manufatto.

Per generare il manufatto è necessario eseguire correttamente due diverse procedure: una di tipo informatico per sviluppare via software il file 3D contenente il pezzo e gli eventuali supporti, l'altra manuale per caricare correttamente la M290 con le povere metalliche scelte e per predisporre correttamente il letto di polvere da scansionare.

La procedura informatica prevede di sviluppare il prodotto tramite un software 3D; normalmente si usa un CAD-3D ma è anche possibile creare un modello con lo scanner ottico (*reverse engineering*). Successivamente il file viene processato dal software *Magic* della *SOLIDWORKS*; in questo modo l'oggetto viene convertito in formato stereolitografico e contestualmente si ottengono un file con estensione ".stl" per il manufatto ed un file con estensione ".cli" per gli eventuali supporti. Entrambi i files vengono poi elaborati tramite il software *RP-Tools* della *EOS* che effettua la sezionatura nei diversi strati; lo spessore del piano dipende dalle dimensioni delle polveri (nel nostro caso $40\ \mu\text{m}$ per le polveri di Inconel-625 e 30

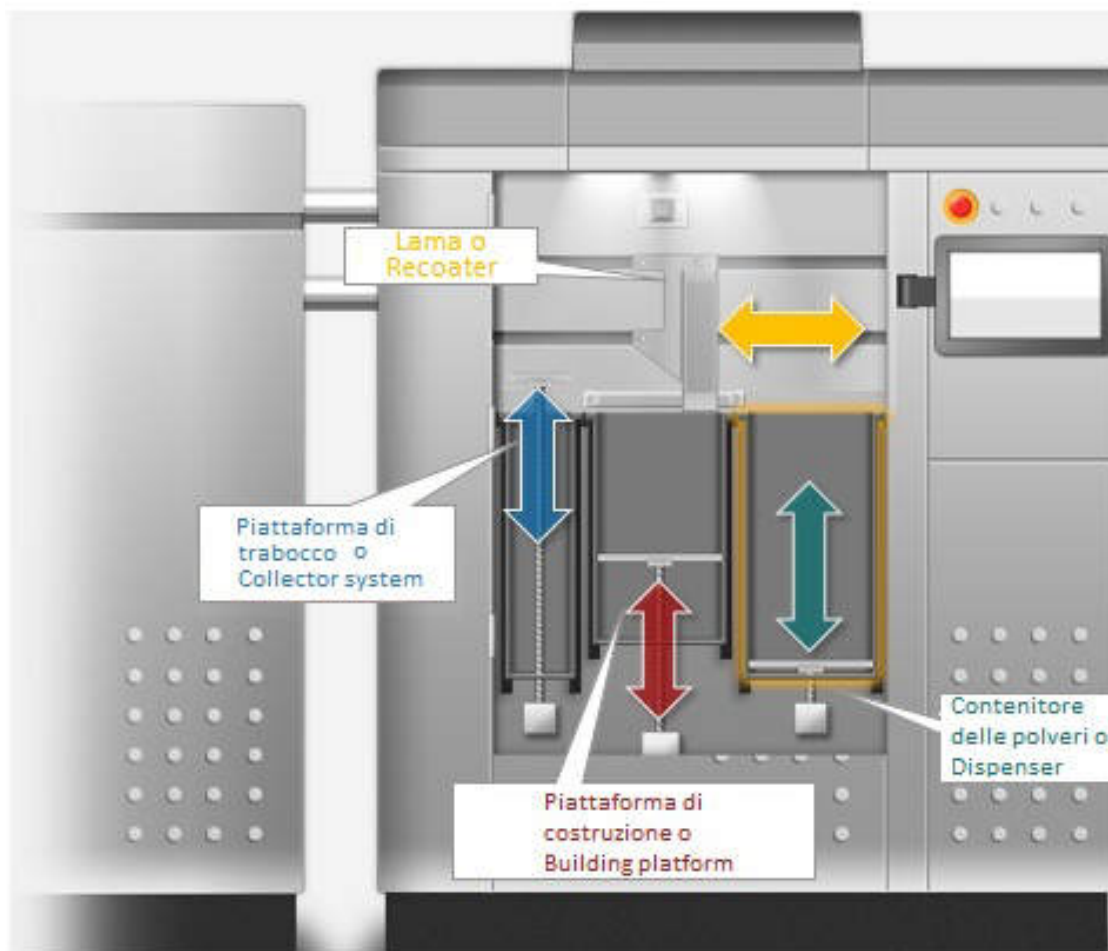


Figura 18: Composizione della M290 con l'indicazione delle movimentazioni dei diversi assi. Si ringrazia la EOS Ltd.

μm per le polveri di titanio grado 2). I files generati con *RP-Tools* vengono quindi salvati in un unico software che avrà estensione ".sli"; questo file verrà caricato nella M290 e sarà possibile replicarlo più volte e scegliere, per ogni replica, la posizione più adatta all'interno della camera di costruzione.

La procedura per predisporre correttamente il letto di polveri deve essere eseguita da tecnici esperti e qualificati. Questi devono rispettare alcune regole a tutela della propria salute: durante tutta la procedura è bene evitare di bere, mangiare o fumare e non si devono utilizzare fiamme libere a causa della pericolosità delle polveri che si possono facilmente incendiare. Per questo motivo esse vanno sempre stoccate e prelevate da contenitori (*bin*) idonei. Occorre sempre avere a disposizione, nelle immediate vicinanze, un estintore di classe D. Se presente, bisogna spegnere l'impianto di areazione forzata, perché potrebbe smuovere le polveri che non devono essere inalate per evitare gravi problemi di salute (asbestosi). Per lo stesso motivo, dopo qualunque tipo di contatto con le polveri metalliche, è bene lavarsi scrupolosamente con acqua e sapone.

Durante tutta la procedura di preparazione del macchinario è necessario indossare diversi dispositivi di protezione (DPI): guanti ignifughi (nome EN 407-

2:2004 livello 4, EN 374-2:2014 o EN 374-4:2013); tuta da lavoro ignifuga (EN ISO 11612:2015); scarpe antinfortunistiche con scarica a terra (*ElectroStatic Discharge*) ESD (EN 61340-5-1:2016) che, oltre ad evitare fulminazioni, prevengono infortuni nel caso in cui il manufatto, o la piastra che lo contiene, cadesse dalle mani dell'operatore; occhiali protettivi con protezioni laterali (EN 166:2004) e maschera protettiva con filtro P3 o, in alternativa, una maschera full-face con filtro di protezione P3 e ricircolo dell'aria (norme EN ISO 10720:1998 e EN 529:2006), perché quando si caricano le polveri nel serbatoio, o quando si estrae il manufatto, possono generarsi nuvole dannose per la salute. L'operatore deve prestare attenzione a lavare accuratamente gli indumenti utilizzati perché quando si appoggia al macchinario la polvere si deposita su questi ultimi e, se respirata, a lungo andare può portare problemi anche gravi alla salute (asbestosi).

In dotazione con il macchinario vengono forniti dalla EOS due diversi aspirapolveri: il primo denominato gorgogliatore (o *ruwac*) per aspirare lo scarto della lavorazione, le scorie che si sviluppano quando il laser scansiona il letto, Figura 20; l'altro per prelevare le polveri ed inserirle nel dispenser oltre che per aspirare e riciclare quelle stese e non sinterizzate, Figura 19. Una volta aspirate, le polveri non utilizzate vengono convogliate in una macchina setacciatrice, Figura 21 per essere ripulite dalle impurità che possono contenere. Infine, tra i macchinari in dotazione troviamo l'elevatore a forcelle Figura 22 che serve a movimentare sia i contenitori delle polveri pieni, sia la piastra di costruzione contenente i manufatti realizzati.



Figura 19: Aspiratore per le polveri nuove e quelle inutilizzate da riciclare.



Figura 20: Aspiratore per il materiale di scarto della lavorazione.



Figura 21: Macchinario per la rimozione degli scarti di lavorazione presenti nelle polveri non sinterizzate.



Figura 22: Elevatore a forcelle per spostare la piastra di costruzione contenente i manufatti.

0.18.1 Procedure per la predisposizione del macchinario ed avvio del *job*


Per avviare la EOS M290, Figura 17, è necessario seguire scrupolosamente una ben definita procedura. Affinché la macchina possa essere messa in funzione è necessario premere il pulsante blu che si trova sul retro del macchinario, Figura 23 e serve per attivare l'impianto di emergenza. Sulla parte anteriore della M290 sono presenti diversi pulsanti e selettori; in Figura 24 possiamo osservare il fungo per l'arresto di emergenza (a); il selettore a chiave che deve essere estratta perché la macchina vada in funzione(b); il selettore a chiave per la scelta del gas inerte (argon o azoto); l'allacciamento alla rete per collegare un personal computer esterno (d). Selezionare dallo schermo mobile di cui è dotata la M290, Figura 18 la modalità *Default Supervisor*.


Ogni volta che la macchina viene spenta e poi accesa, occorre regolare la distanza della piattaforma di costruzione, Figura 26 e la posizione spaziale della piattaforma stessa (piano *xy*); rispetto al *recoater*, Figura 25. Se la piattaforma non è correttamente regolata, i manufatti non cresceranno in modo corretto. L'iter da seguire per giungere a questa regolazione è piuttosto lungo e composto da un certo numero di passi.

Innanzitutto la piattaforma di costruzione, Figura 26 deve essere pulita con isopropanolo o alcool etilico non denaturato e la camera di lavoro deve essere accuratamente aspirata con il gorgogliatore, Figura 20. Il ruwac è un aspiratore a liquido e serve per aspirare lo scarto della lavorazione. Il gorgogliatore può contenere solo acqua o hydrosol, una soluzione liquida che evita odori sgradevoli. Il ruwac deve essere pulito settimanalmente per prevenire forti odori e l'intasamento del suo scarico. In caso contrario, le scorie che assorbe potrebbero accumularsi ed otturare lo scarico; inoltre il materiale che sedimenta al suo interno non permette di capire se il livello dell'hydrosol è adeguato.

Siccome potrebbero essere presenti residui delle precedenti lavorazioni, è sempre bene utilizzare il ruwac e l'accessorio a spazzola (in dotazione con il macchinario), per ripulire dall'ossido e dai residui di lavorazione (scorie) le guarnizioni della porta, stando attenti a non rigare il vetro perché altrimenti l'accumulo di polvere, a lungo andare, non ne permetterebbe la perfetta chiusura; questo potrebbe essere dannoso per l'operatore che, in questo caso, inalerebbe le polveri.

Successivamente è necessario avviare il funzionamento della lama: dalla schermata principale dello schermo mobile, Figura 27, selezionare il pulsante chia-

ve inglese(*Maintenance*) , di seguito il pulsante *Recoater Homing Start*

. In questo modo il recoater si avvicina a sinistra e torna indietro. Fino a che la schermata non scompare non bisogna toccare nulla.

A questo punto l'operatore, sempre equipaggiato con gli opportuni DPI, è libero di movimentare a suo piacimento la lama: per spostare a sinistra il recoater basta selezionare il pulsante di spostamento automatico a sinistra *Move recoater to left*



end  oppure si può effettuare la procedura manualmente con il pulsante *Move*



Figura 23: Pulsante blu posizionato sul retro della M290. È necessario premerlo per avviare la macchina.



Figura 24: Pulsanti necessari per la messa in funzione del macchinario. a) Pulsante per l'arresto di emergenza, b) interruttore a chiave per l'avvio del macchinario, c) selettore a chiave del gas inerte, d) allacciamento alla rete per il collegamento di un computer alla macchina.

recoater to left . L'operatore può decidere di farlo avanzare tramite il selettore : se seleziona quello di destra, la lama si sposterà velocemente,

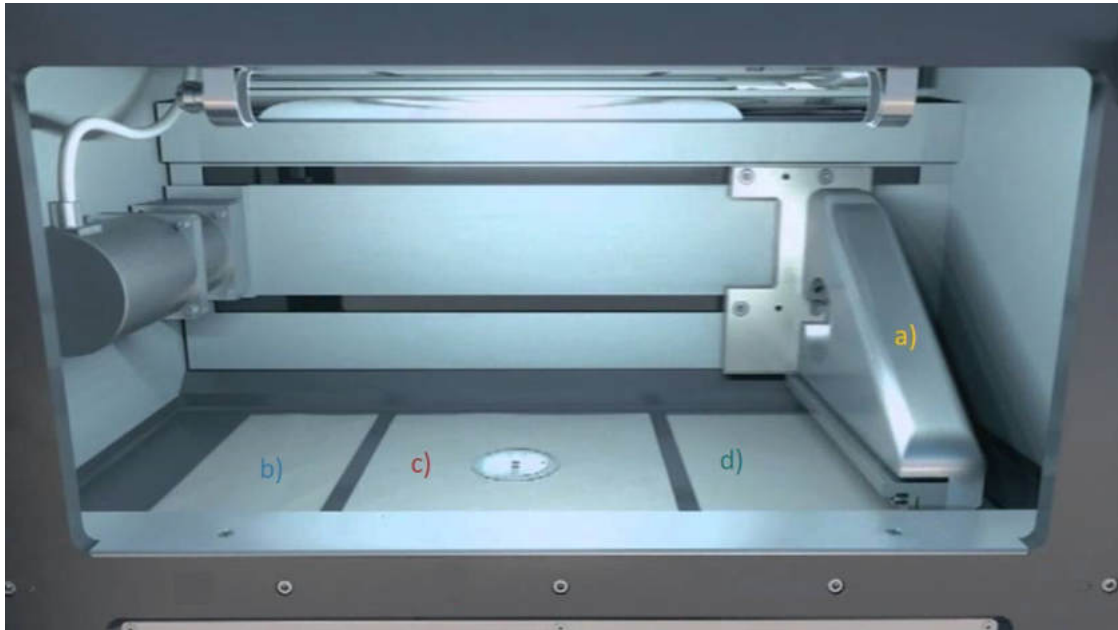


Figura 25: Camera di costruzione EOS M290, sono visibili: a) la lama o recoater; b) la piattaforma di trabocco; c) il carrier della la piattaforma di costruzione e d) il dispenser.

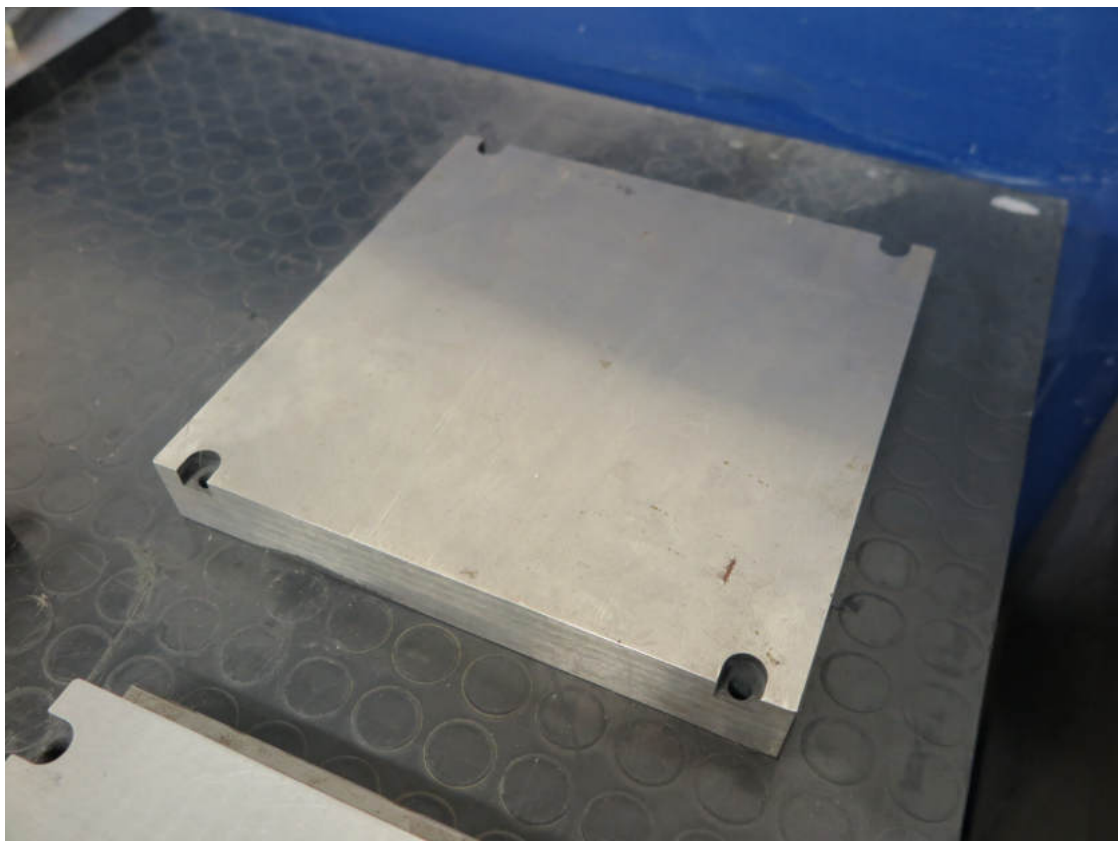


Figura 26: Piattaforma di costruzione.

se seleziona quello di sinistra, la lama si sposterà lentamente.

A seguire è necessario rimuovere ed aspirare accuratamente il vetro protettivo



Figura 27: Schermata principale che compare quando si avvia la procedura per la stesura del letto di polveri.



delle lenti F-Theta o *nozzle ring*, Figura 30. Le lenti F-theta, Figura 32 evitano che il fascio laser tenda a diventare ellittico invece di restare circolare, per questo motivo svolgono una funzione essenziale per la buona riuscita del processo di fabbricazione. Tra le lenti F-Theta e il vetro protettivo, durante l'esecuzione del *job*, viene inviato un flusso costante di gas inerte per evitare che le polveri si possano depositare sulle lenti, compromettendo la lavorazione. Inoltre l'ugello di aspirazione, Figura 28 e 29, aspira il gas di protezione che viene convogliato nella camera di processo (per evitare l'ossidazione del manufatto) e la nuvola di polveri che si genera durante l'esecuzione del *job*. Essi vengono poi incanalati verso un opportuno contenitore ubicato all'interno dell'impianto filtrante a circolazione d'aria. In questo modo si impedisce che anche sul vetro di protezione delle lenti F-Theta si possano depositare scorie e pulviscolo durante il processo di fabbricazione. Quando si stende il letto di polveri, una parte di queste si solleva e si deposita sul vetro protettivo. Ripulirlo accuratamente prima di mandare il *job* in esecuzione, può fare la differenza sulla buona riuscita del manufatto. Per questo motivo il vetro protettivo verrà riposizionato in sede solo quando il letto di polveri sarà completamente steso, dopo una accurata e minuziosa pulizia. Una volta rimosso il vetro protettivo, l'operatore dovrà chiudere la porta per abbassare il piano di lavoro e la piattaforma di trabocco di almeno 40 mm, fino a che non vedrà il nero della plastica che circonda la camera di processo. Per movimentare il Collector system



Figura 28: Ugello di aspirazione. Attraverso le bocchette aspira il gas di protezione e la nuvola di polveri che si sviluppa durante la lavorazione e le convoglia ad un opportuno contenitore collocato all'interno dell'impianto filtrante a circolazione d'aria.




Figura 29: Ugello di aspirazione posizionato correttamente in sede.

selezionare il tasto  e successivamente il tasto per la movimentazione degli assi .

Poi selezionare *Platforms Inching run / Step movement*






inserire manualmente un valore, per esempio 40, e dare invio. Selezionare il tasto

Move down collector platform : la piattaforma di trabocco si sposterà di 40 mm.


Aspirare il collector system con l'aspirapolvere, Figura 19 per poter riciclare le eventuali polveri ancora presenti ai bordi tra la piattaforma di trabocco e quella di costruzione.


Ora è possibile movimentare la piattaforma di costruzione per posizionarla correttamente rispetto alla lama. Per abbassare la piattaforma di costruzione occorre


selezionare l'opportuno tasto: . Con l'aspiratore per il riciclo delle polveri è bene, anche in questo caso, aspirare accuratamente la base per il posizionamento della piattaforma di costruzione, il carrier della piattaforma, i fori delle viti filettate nonché il bordo del dispenser. Successivamente è necessario abbassare il dispenser


con l'apposito pulsante ( per un movimento lento, oppure  per un movimento rapido); posizionare il setaccio interno Figura 33 e collegarlo alla messa a terra dell'impianto elettrico.

Prima di alloggiare la piattaforma di costruzione sul carrier; è necessario carteggiarla e successivamente pulirla accuratamente con l'isopropanolo per fare aderire meglio le polveri metalliche. Stando attento a non farsi male alle mani, con i guanti, l'operatore posizionerà la piattaforma sul supporto mobile ed effettuerà un primo serraggio grossolano senza stringere troppo le viti, perché la piattaforma andrà serrata a caldo con la chiave dinamometrica regolata ad 11 Nm. Per portarla

ad 80°C è necessario selezionare il pulsante  oppure; in alternativa si può

pre-caricare il *job* dall'elenco selezionando il tasto  e premendo il tasto *play*

. In questo modo la M290 avvia la procedura di pre-riscaldamento della piattaforma fino a raggiungere gli 80°C voluti.



Di seguito si deve selezionare il tasto *Flood Recirculating filter system*  per riempire il sistema filtrante esterno (*Recirculating Filter System* - RFS) con il gas inerte. Una volta raggiunta la temperatura di 80°C, con i guanti ignifughi, l'operatore potrà serrare la piattaforma con la chiave dinamometrica posta ad 11 Nm. Una volta raggiunta questa temperatura, potranno iniziare le procedure per l'allineamento tra la piattaforma di costruzione e la lama. Da questo momento in poi, sarà necessario chiudere sempre lo sportello per movimentare gli assi.

Di seguito andrà rimosso il setaccio quadrato che protegge le polveri contenute nel dispenser, Figura 33 avendo cura di scollegarlo dall'impianto di messa a terra, per iniziare a livellare il letto delle polveri metalliche.

L'operatore dovrà effettuare movimenti al massimo di mezzo millimetro alla volta: se dovesse far salire troppo il dispenser quando il recoater si sposta durante la lavorazione, c'è il rischio che la lama raccolga e stenda polveri in eccesso, creando così delle "montagnole" sulla piattaforma. D'altro canto il dispenser non può essere posizionato troppo in basso; altrimenti c'è il rischio di prelevare un quantitativo

di polveri non sufficiente per ricoprire al meglio la piattaforma stessa. É estremamente importante regolare correttamente anche la posizione del dispenser affinché il recoater prelevi il giusto quantitativo di polveri per creare un nuovo strato.

Per farlo è necessario prima regolare la posizione della piattaforma di costru-

zione rispetto alla lama. L'operatore dovrà selezionare i tasti  e ; successivamente selezionare i comandi opportuni (manuali o automatici purché con la freccia centrale evidenziata che rappresenta l'asse del carrier, Figura 18 e 25) fino a che, ad occhio, il livello del piano di lavoro e quello del dispenser non sono uguali.

É bene accertarsi che la lama metallica montata sul recoater, adibita al vero e proprio spostamento delle polveri, sia in buono stato.

Se era stato precedentemente eseguito un *job*, è opportuno ripulire la lama metallica del recoater dalle polveri residue, allentando leggermente i bulloni e dando un colpetto con le dita, premurandosi di indossare sempre i guanti.

Se il filo della lama metallica fosse rovinato, è possibile svitare completamente i bulloni e ruotarla. Nel caso in cui anche l'altro lato fosse rovinato, è necessaria la sua sostituzione. Quando la si riposiziona in sede, occorre aver cura di stringere con la chiave dinamometrica impostata a 14 Nm, nell'ordine la prima delle sette viti partendo dal fondo del recoater, la settima e la quarta, poi le restanti. Una volta ripulita e posizionata la lama, è possibile avviare la procedura di regolazione con la piattaforma di costruzione. Per farlo saranno necessari una chiave dinamometrica, il comparatore centesimale e gli spessimetri, Figura 34. Un giro del comparatore centesimale corrisponde a mezzo millimetro. La lancetta grande misura i centesimi, quella piccola ha un range di funzionamento tra 0 e 3: l'operatore deve accertarsi che quest'ultima sia compresa sempre tra 1 e 2. Non bisogna mai portarla al limite per evitare di andare fuori corsa.

Anche in questo caso il carrier della piattaforma di costruzione deve essere ben ripulito; nel caso ci fosse ancora un po' di polvere, si deve aspirare con il ruwac. L'operatore deve ora prendere il comparatore ed appoggiarlo alla lama del recoater, successivamente posizionare il recoater sopra al *pivot*, Figura 36; ruotare la ghiera del comparatore e posizionarla sullo zero. Dopo aver dato un paio di colpetti con le dita al pulsante del comparatore, è necessario portarlo sullo zero e poi spostarlo avanti, nella direzione del primo riferimento; effettuare la comparazione e modificare la posizione del carrier con il pulsante di sinistra posto sulla cassa della M290, sotto lo sportello, Figura 37.

Per l'asse *y*: premendo il pulsante in alto, la piattaforma modulare si solleverà anteriormente a sinistra; premendo il pulsante in basso, la piattaforma modulare si abbasserà a sinistra. Quando comparatore e piattaforma di costruzione saranno allineati, sarà stato fissato lo zero per l'asse *y*, ovvero $y = 0$.

Allo stesso modo l'operatore regolerà anche l'asse *x*. Per farlo si dovranno spostare il recoater munito del comparatore centesimale all'altezza del riferimento di destra, Figura 26. Di seguito si posizionerà il comparatore al centro del recoater e poi di nuovo verso i due riferimenti indicati in Figura 35. Per regolare l'asse *x* si dovrà premere l'opportuno pulsante, Figura 37: se si preme a sinistra, la piattaforma si solleverà centralmente a destra; se si preme a destra, la piattaforma si abbasserà

centralmente. É bene ripetere la procedura almeno un'altra volta, perché muovendo gli assi si perde un po' di precisione. Una volta finite le comparazioni, la lama sarà normale al piano xy .

É importante che l'operatore effettui a mano questi spostamenti, perché se il comparatore fosse sul piano di lavoro mentre il recoater viene azionato a porte chiuse, o mandato a fine corsa velocemente, si rischierebbe che il comparatore cadesse e si rompesse.

Una volta regolata la piattaforma di costruzione, raggiunta la temperatura di 80°C l'operatore, con i guanti, deve serrare a croce la piastra con la chiave dinamometrica impostata ad 11 Nm.


A questo punto si procederà prima alla regolazione del contenitore delle polveri per effettuare correttamente il livellamento delle stesche sulla piattaforma, poi si potrà collocare in sede l'ugello di aspirazione ed in ultimo, dopo una pulizia minuziosa, si inserirà nel suo alloggiamento il vetro protettivo delle lenti F-Theta. É bene che l'operatore segni su carta il valore che vede indicato in alto a sinistra sul video: indica la posizione relativa tra lama e piattaforma di costruzione e servirà come primo riferimento per la stesura dello strato di polveri.


Per impostare correttamente la distanza tra lama e piano di costruzione l'operatore prima abbasserà manualmente la piattaforma di costruzione di 2 o 3 mm (la M290 non permette il movimento automatico del carrier se il recoater non è a fine corsa); poi muovendosi lentamente di un centesimo alla volta (basta impostare



0.1 sullo schermo del selettore) ed usando gli spessimetri, la alzerà fino a raggiungere misura voluta. Ad esempio, per le polveri di Inconel-625, il letto deve essere regolato a 40 μ m; quindi, se lo spessimetro da 0.35 passa tra lama e piattaforma senza problemi, ma non quello da 0.4 significa che lo spazio tra recoater e piattaforma di costruzione è ottimale: se fosse troppo "alta" la lama non riuscirebbe a depositare bene le polveri, se invece fosse troppo "bassa" si rovinerebbe la lama.

L'operatore poi regolerà ad occhio la piattaforma di trabocco, in modo che resti circa un dito più in basso rispetto a quella di costruzione (si deve vedere il bordo nero) per favorire il riciclaggio della polveri che verranno stese e non sinterizzate. Durante questa fase, per non sporcare la lama, è bene mandarla a fine corsa (tutto a destra) e abbassare di 1 mm la piattaforma di costruzione.


Ora si può avviare la fase di stesura di alcuni strati del letto di polveri. L'operatore doserà il materiale cliccando sul tasto *Raise dispenser platform* . Affinché il letto sia correttamente steso, occorre che tutti i fori delle viti di ancoraggio tra la piattaforma di costruzione, Figura 26 ed il suo carrier, siano completamente ricoperti.

Quando i fori con le viti non sono più visibili; l'operatore stenderà ancora un paio di layer con il tasto : in questa fase è bene mandare il recoater a fine corsa lentamente per evitare di stendere male la polvere.

Una volta che le viti sono completamente ed uniformemente coperte e la piastra sembra lucida, si potrà riportare la piattaforma di costruzione sullo zero alzandola


di 1 mm.


Ora l'operatore dovrà posizionare l'ugello di aspirazione, Figura 28 che serve per proteggere le lenti F-Theta, Figura 32 aspirando il gas di copertura e le polveri che si sollevano durante la lavorazione e evitando così che queste ultime vadano ad accumularsi sul sistema di lenti ed inficino la funzionalità del fascio laser. Si dovranno successivamente pulire minuziosamente sia il vetro di protezione sotto le lenti F-Theta che lo schermo protettivo, Figura 31 rimosso in precedenza dal suo alloggiamento. Occorre in questa fase prestare la massima attenzione a non toccare anche accidentalmente il letto di polvere appena steso perché vanificherebbe tutta la procedura effettuata rovinandolo.




Per questa operazione l'operatore spegnerà la luce interna alla macchina, al fine di evitare eventuali riflessi, selezionando il pulsante  (in alternativa po-

trà selezionare il tasto *Maintenance* , cliccando a sinistra su *Maintenance, Process chamber*; e commutando su OFF il selettore *Light (process chamber top) ON / OFF*).


Per agevolare la procedura è bene utilizzare dei guanti monouso in lattice. L'operatore spruzzerà dell'isopropanolo su un fazzoletto di carta nuovo e pulito e aspetterà che diventi opaco prima di passarlo sul vetro. Non si deve assolutamente usare l'alcool etilico denaturato perché quando si avvierà la macchina, gli additivi che contiene bruceranno causando seri danni al macchinario. Per vedere meglio aloni ed impurità, il tecnico userà la luce snodabile, Figura 38 tenendola in diagonale rispetto al vetro delle lenti f-Theta. Il vetro dovrà essere pulito con un movimento a spirale, partendo dal centro, fino a raggiungere la parte più esterna, senza esercitare pressione o ripassare nei punti già puliti per evitare di lasciare peluggini, aloni o rigare il vetro con eventuali polveri presenti sullo stesso.


Una volta pulito, si potrà riattivare la luce interna alla macchina ed inserire correttamente il nozzle ring. Quest'ultimo è magnetico e si innesta da solo, una volta inserito occorre solo muoverlo leggermente a dx e a sx. L'operatore chiuderà lo sportello e pigerà il tasto  per far affluire gas di copertura tra le


lenti F-Theta ed il vetro di protezione. Infine cliccherà su  per entrare nella schermata relativa alle fasi che precedono il caricamento dei files che contengono il manufatto ed i suoi supporti, vedi Figura 39.

Cliccando sulle icone ,  e , il tecnico riempirà di gas inerte il sistema filtrante a circolazione d'aria, farà fluire l'argon all'interno della camera di processo e del sistema di elevazione della piattaforma di lavoro. In questo modo diminuirà la concentrazione di ossigeno all'interno della macchina.

Ora selezionando *Building tasks* , l'operatore avrà accesso alla schermata per l'avvio del *job*, Figura 40.

A questo punto sarà possibile visualizzare sullo schermo l'elenco dei *job* precedentemente caricati nella macchina. Selezionando quello desiderato e cliccando su  la M290 caricherà i files e farà una stima della polvere necessaria per la realizzazione dei manufatti e dei tempi necessari per completare il lavoro (l'ora ed il giorno).

Da questa schermata è anche possibile interrompere il *job* cliccando sul tasto pausa ; far ripartire la macchina da uno strato qualunque semplicemente selezionandolo; oppure escludere una parte del *job* in esecuzione isolando un certo numero di strati.

Eventualmente il dosaggio delle polveri può essere modificato manualmente, selezionando  ed impostando la percentuale voluta (non meno del 40%).

È consigliabile costruire i primi 5 o 6 strati dei supporti con una percentuale del 200 % per far aderire meglio il supporto alla piastra e poi riportarlo al 100 %.

In ultimo è bene attendere 10 minuti dalla conclusione del *job* prima di spegnere completamente la macchina: il radiatore sta ancora raffreddando il laser per evitare che si surriscaldi.

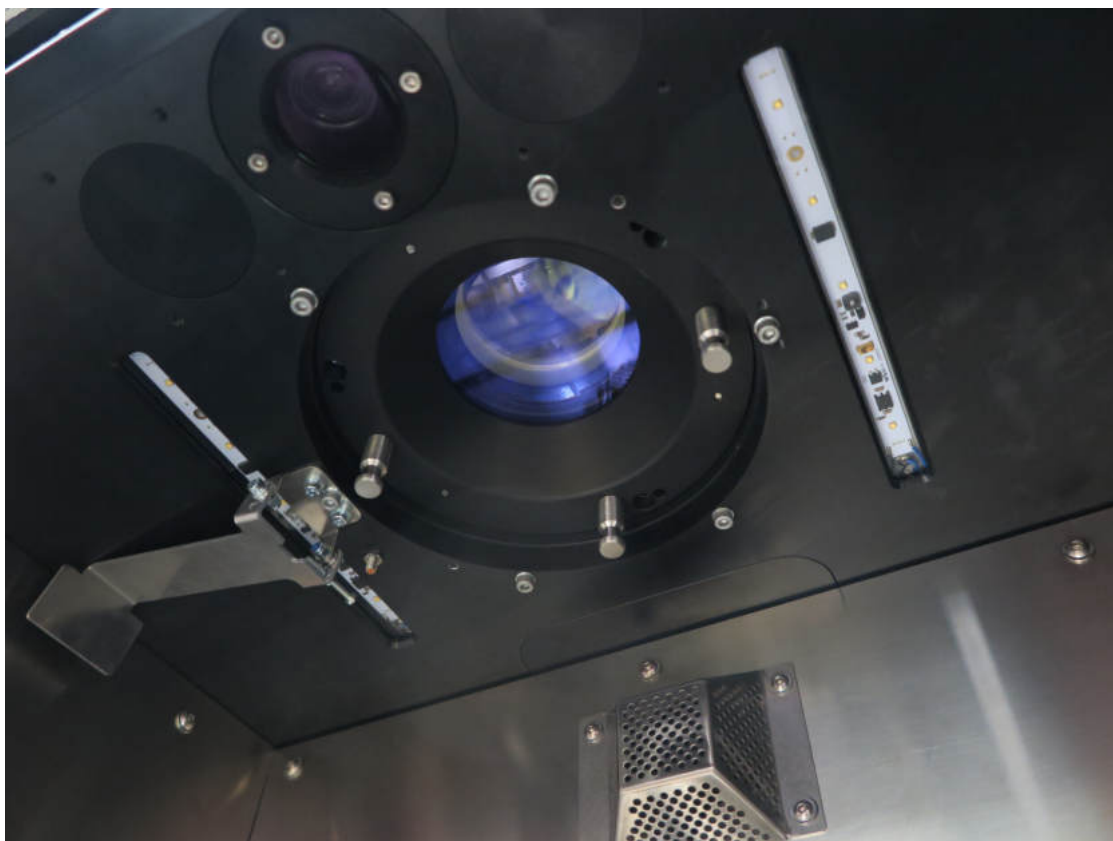


Figura 30: Vetro protettivo delle lenti F-Theta in sede.



Figura 31: Vetro protettivo delle lenti F-Theta estratto dalla camera di costruzione. Si possono osservare le manopole per l'estrazione ed il riposizionamento.

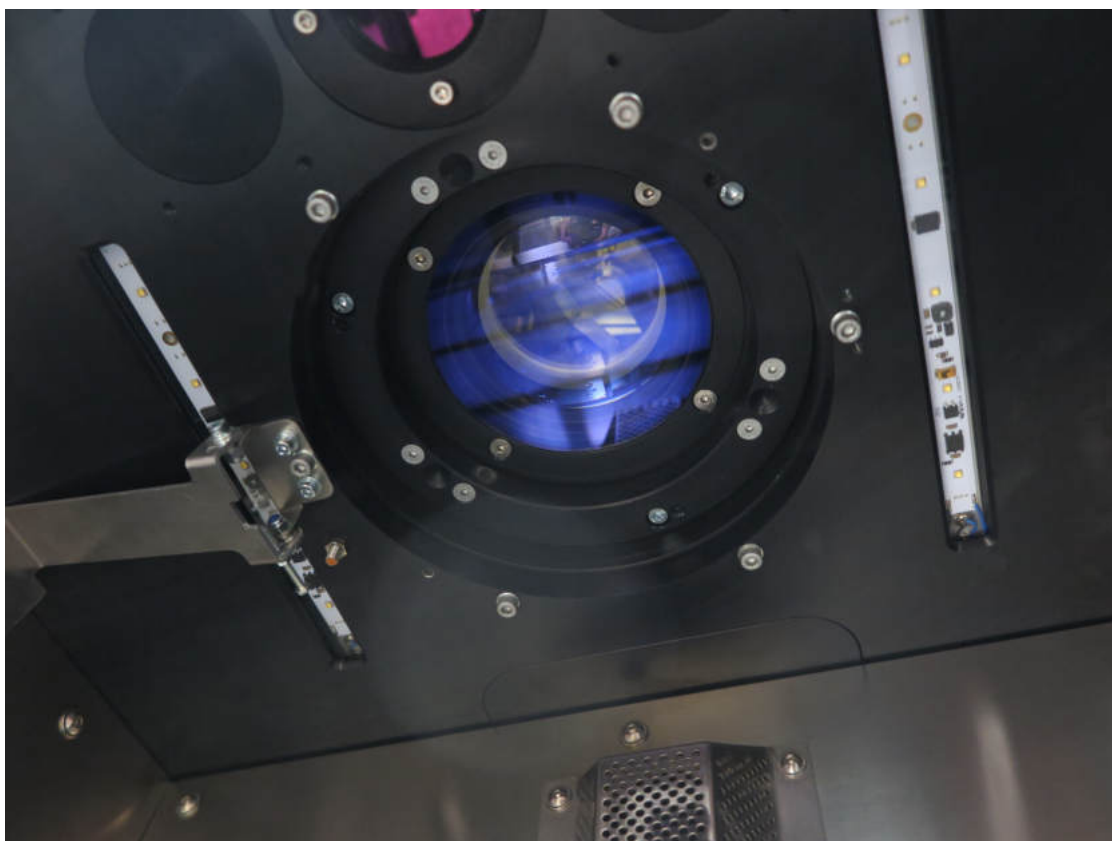


Figura 32: Lenti F-Theta. Le lenti F-theta evitano che il fascio laser tenda a diventare ellittico invece di restare circolare, per questo motivo ricoprono una funzione essenziale per la buona riuscita del processo.

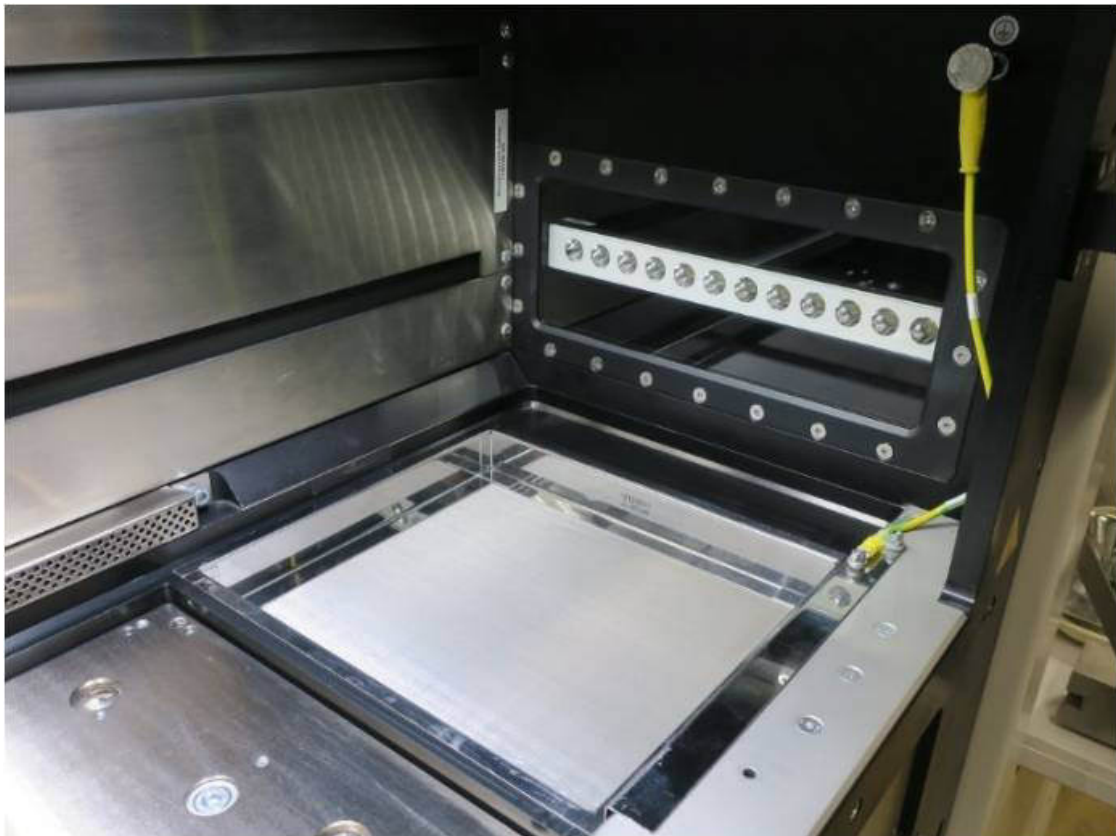


Figura 33: Setaccio quadrato da inserire all'interno della camera di costruzione durante le operazioni di avviamento del macchinario o quando non si utilizza il macchinario.



a)



b)

Figura 34: a) Comparatore centesimale e b) spessimetri da utilizzare per il corretto posizionamento della piattaforma di costruzione rispetto alla lama.

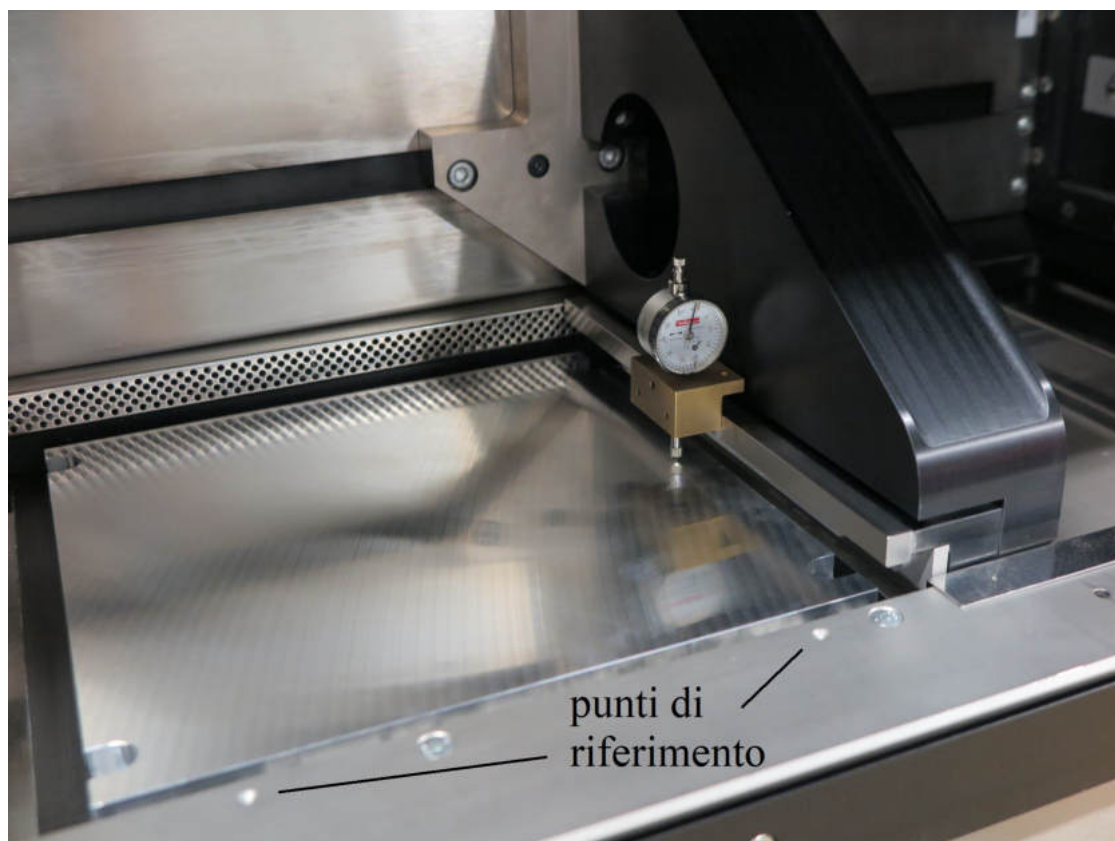


Figura 35: Regolazione fine della piattaforma di costruzione rispetto alla lama metallica del recoater, da effettuarsi con il comparatore centesimale. Sono indicati i punti di riferimento per la regolazione.

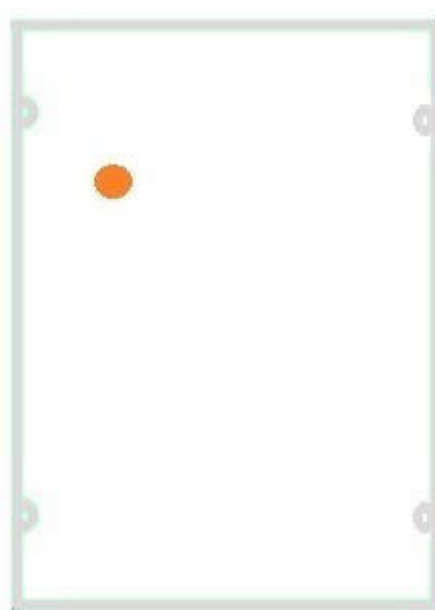


Figura 36: Rappresentazione ideale delle piattaforma di costruzione con indicazione del *pivot*.

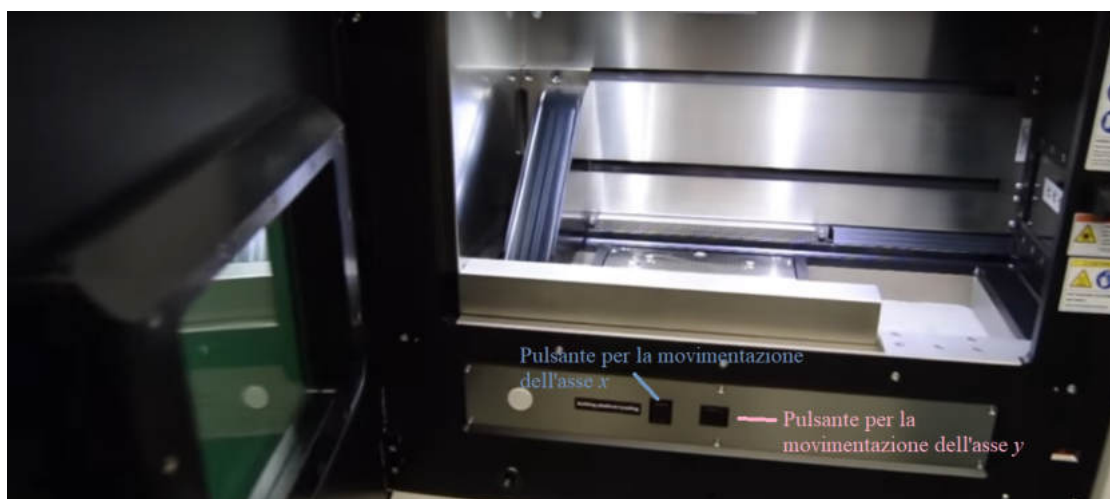


Figura 37: Pulsanti per la regolazione del piano di costruzione rispetto alla lama, posizionati sulla cassa della M290, sotto lo sportello. Il primo a sinistra serve per la regolazione dell'asse y , il secondo per la regolazione dell'asse x .



Figura 38: Luce snodabile da usare per la pulizia delle lenti F-Theta.



Figura 39: Schermata che appare quando clicchiamo sul pulsante *Process conditions*.

No.	Name	Building time	Building height	Material layer thickness	Note
22	Gear_wheel	08:33:38	17,280 mm	IN625 0.040 mm	No comments
23	IIS1	07:17:55	18,000 mm	IN625 0.040 mm	IIS Knobs
24	IN6265 _10_17-	11:09:58	30,600 mm	IN625 0.040 mm	No comments
25	Final_	15:43:46	68,760 mm	IN625 0.040 mm	dei primi due job. Supporti esagerati nella speranza che non crash
26	DEV_	26:48:27	104,600 mm	IN625 0.040 mm	- modificato JOB
27	_job	25:29:09	104,600 mm	IN625 0.040 mm	No comments
28	_final2	05:11:52	31,000 mm	IN625 0.040 mm	No comments


Figura 40: Schermata che appare quando si avvia il caricamento dei files con i disegni tridimensionali dei manufatti da realizzare.


0.18.2 Rimozione del *job*.

La procedura di rimozione del *job* si effettuano seguendo le indicazioni suggerite passo passo direttamente dalla M290. Terminata la lavorazione, sullo schermo della M290 compare il tasto *wizard*. Una volta premuto, questo suggerisce una serie di cinque passaggi ordinati (*steps*), da effettuare per rimuovere correttamente la piattaforma di costruzione contenente i manufatti realizzati. A seconda dell'azione da compiere, è possibile movimentare la lama e/o gli assi. I pulsanti necessari per i diversi movimenti vengono indicati in basso sullo schermo.


Anche in questo caso l'operatore dovrà indossare tutti i dispositivi di protezione necessari: guanti ignifughi, tuta e scarpe antinfortunistica.


Il primo passaggio suggerito consiste nel pulire con la spazzola in dotazione e nell'aspirare accuratamente con il ruwac, Figura 20 vetro e guarnizioni della porta, oltre alle scorie presenti sull'ugello di aspirazione. Quest'ultimo potrà essere estratto per essere aspirato accuratamente. Una volta terminata questa prima parte,


l'operatore premendo il tasto  in basso a destra, accederà al secondo ed al terzo passaggio.


Dovrà quindi chiudere la porta e abbassare il dispenser premendo su ; aprire lo sportello e, con l'aspirapolveri per il riciclo delle stesse, Figura 19, aspirare le polveri intorno al dispenser e inserire il setaccio quadrato Figura 33 avendo cura di collegarlo all'impianto di messa a terra.

Terminate queste operazioni e premendo  verranno fornite le indicazioni per il quarto step.

Si dovrà chiudere lo sportello ed abbassare la piattaforma di lavoro che contiene il *job* premendo , per evitare di rovinare inavvertitamente la lama o il *job* stesso. Successivamente sarà possibile spostare la lama completamente a destra


pigiando il tasto  in modo da aspirare le polveri inutilizzate accumulate nella piattaforma di trabocco. Per farlo, l'operatore dovrà aprire lo sportello,

aspirare la polvere dalla piattaforma di trabocco e abbassarla con il tasto .

A questo punto sarà possibile selezionare il tasto di spunta  in basso a destra per avanzare con il *wizard* all'ultima procedura, quella per l'estrazione del *job*. Questo ultimo step, che è stato suddiviso in tre parti, permette di movimentare tutti e tre gli assi (piattaforma di trabocco, piattaforma di costruzione e dispenser delle polveri) con gli opportuni tasti in basso sullo schermo.

L'operatore, sempre con l'aspirapolveri per il riciclo Figura 19, dovrà aspirare le polveri non sinterizzate che circondano il *job*, fino a che il manufatto non è completamente visibile. A questo punto potrà svitare le viti di ancoraggio al carrier e, con l'apposito elevatore a forcelle, Figura 22 per il trasposto di oggetti pesanti, estrarre la piattaforma di lavoro ed il suo contenuto.

Al termine di ogni azione l'operatore selezionerà il tasto  fino ad arrivare

alla schermata 3/3. L'ultimo pulsante da pigiare sarà quello di *spunta*  , per confermare il completamento delle procedure necessarie alla rimozione del *job*.

0.18.3 Sostituzione dei filtri e del contenitore di raccolta delle polveri

È necessaria la sostituzione dei filtri denominati F9 e del contenitore per le polveri e scorie metalliche (*collective bin*), raccolte con il sistema di filtraggio, se cambia la tipologia delle polveri in uso oppure se il contenitore è pieno.

Vengono identificate polveri di classe o tipologia B (quelle che contengono alluminio o titanio); tutte le altre vengono catalogate come polveri di classe A, Tabella 4.

Una volta rimosso dal suo alloggiamento il bidone di raccolta delle polveri aspirate durante la lavorazione, avendo cura di indossare tutti i DPI del caso, è necessario che l'operatore passivi il *collective bin* pieno, spargendo sabbia al quarzo asciutta al suo interno; dovrà quindi chiudere bene il suo coperchio per evitare incendi e contattare un centro autorizzato per la rimozione ed lo smaltimento delle stesse.

Classe o tipologia delle polveri metalliche	
A	B
Tutte le polveri che non contengono Al e Ti	Le polveri che contengono Ti e Al

Tabella 4: Diverse tipologie o classi di polveri.

Solo nel caso in cui si sostituiscano polveri di classe A con altre della stessa classe non è necessario cambiare i filtri F9 ed il *collective bin*; in tutti gli altri casi sì, come riassunto in Tabella 5.

Inoltre è necessario rimpiazzare i filtri F9 e il *Collective bin* quando la macchina lo segnala indicandolo a video. Il filtro denominato dalla EOS H14 viene invece

A → A	→	Non è necessario il cambio.
A → B B → A B → B	→	Cambiare filtri F9 ed il contenitore delle polveri e delle scorie metalliche

Tabella 5: Tabella riassuntiva che indica quando è necessaria la sostituzione dei filtri F9 e del *Collective bin*.

sostituito dalla casa madre ogni sei mesi.

0.19 Controlli non distruttivi

Sui campioni in lega di nichel generata mediante la M290 della EOS sono stati effettuati alcuni esami non distruttivi, quali la tomografia assiale computerizzata e l'ispezione agli ultrasuoni.

Scopo dell'ispezione con μ CT era quello di rilevare la presenza di alcuni difetti, diversi per forma e dimensioni, creati ad arte all'interno di un prisma a base rettangolare elaborato tramite un CAD-3D e generato con la M290 presso l'I.I.S, al cui sviluppo ho collaborato.

L'ispezione con gli ultrasuoni è stata ideata per studiare sia l'anisotropia del prisma di cui sopra.

0.19.1 Tomografia assiale computerizzata

In Figura 41 si osserva il disegno CAD di un prisma da sviluppare fisicamente con polveri di Inconel-625 grazie alla EOS M290 ovvero (Figura 17). Nella parte interna del prisma sono stati opportunamente inseriti alcuni difetti, diversi per forma e dimensione, da rilevare tramite XCT. In Figura 41 si nota la presenza di un intaglio posizionato su uno degli vertici estremi del prisma, esso serve da riferimento per ricercare la posizione dei difetti introdotti ad hoc. L'operazione di ricerca delle difettologie nella XTC, è stata agevolata dall'uso dello schema riassuntivo, Figura 42 che contiene l'indicazione planare della localizzazione nello spazio dei difetti realizzati nel prodotto finito e del loro diametro; che varia da 30 μ m a 0.5 mm. La XCT del prisma è stata eseguita a Torino, presso la *Labormet Due S.r.l.* Il tomografo impiegato è il *Phoenix v|tome|x m* della *General Electric*. Dalla XCT è stato possibile individuare solo alcune delle difettologie introdotte. In Figura 44a e b si osserva la tomografia del prisma in corrispondenza del piano situato a 20 mm dal riferimento, dove è stato possibile visualizzare il difetto di 0.3 mm di diametro; mentre in Figura 45 si può osservare la μ CT del prisma in corrispondenza del piano situato a 24 mm dal riferimento dove è stato possibile visualizzare il difetto di 0.5 mm di diametro.

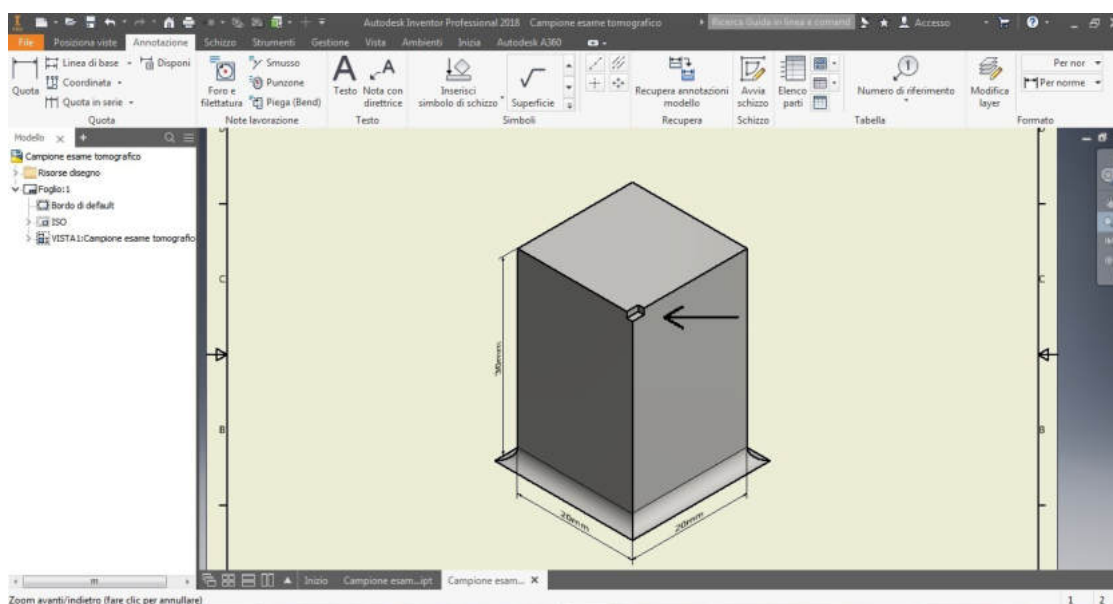


Figura 41: Modello CAD di un prisma realizzato con difetti puntuali diversi per forma e dimensioni. La freccia per indicare l'inciso utilizzato da riferimento geometrico.

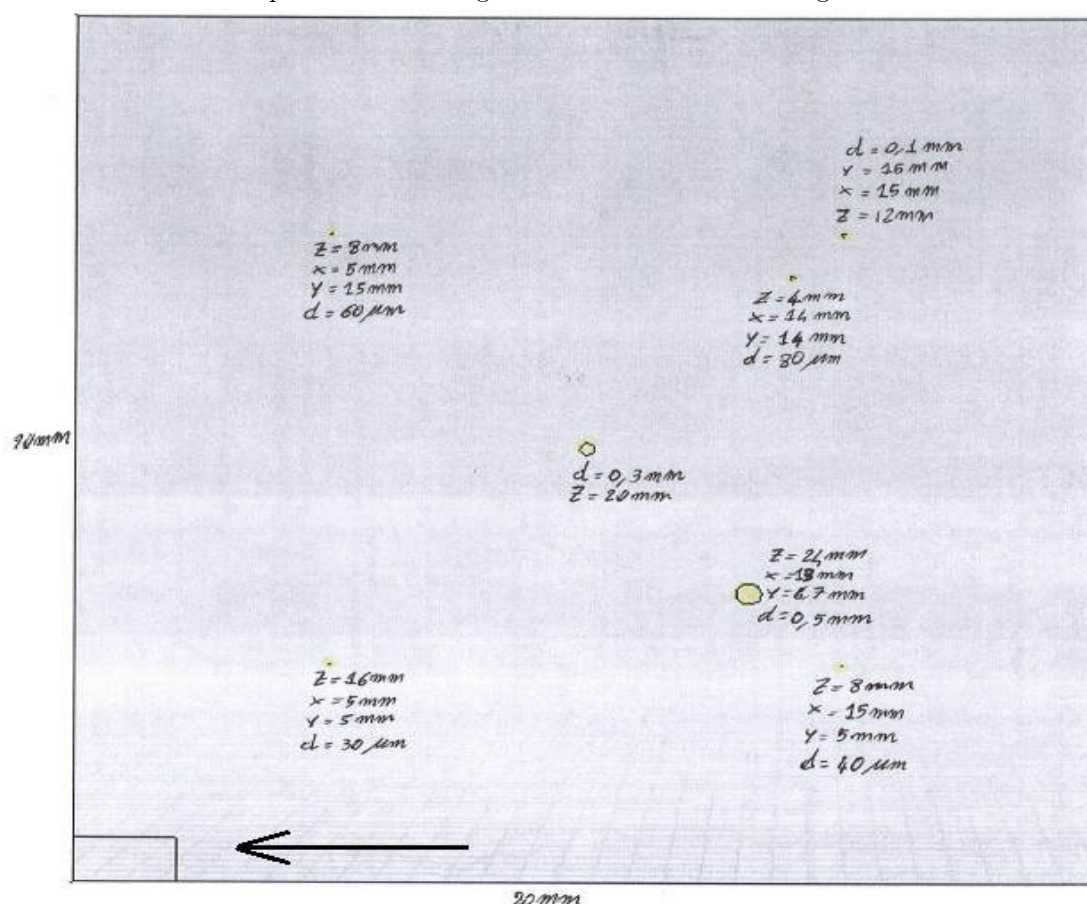
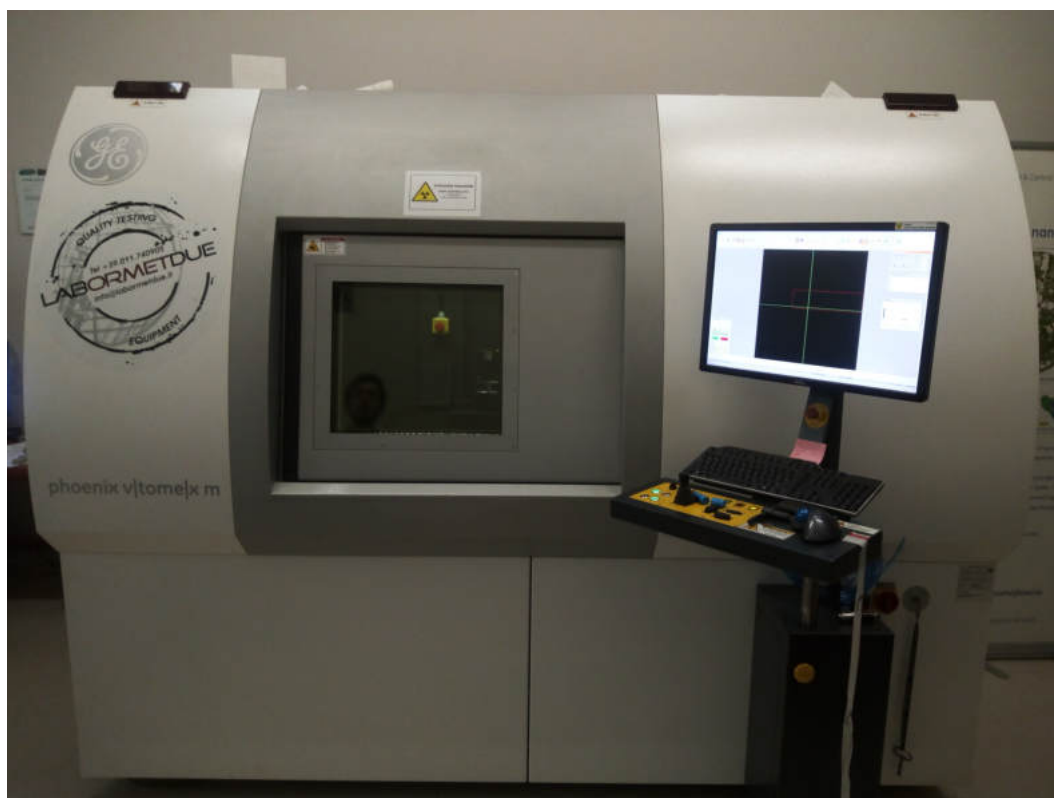
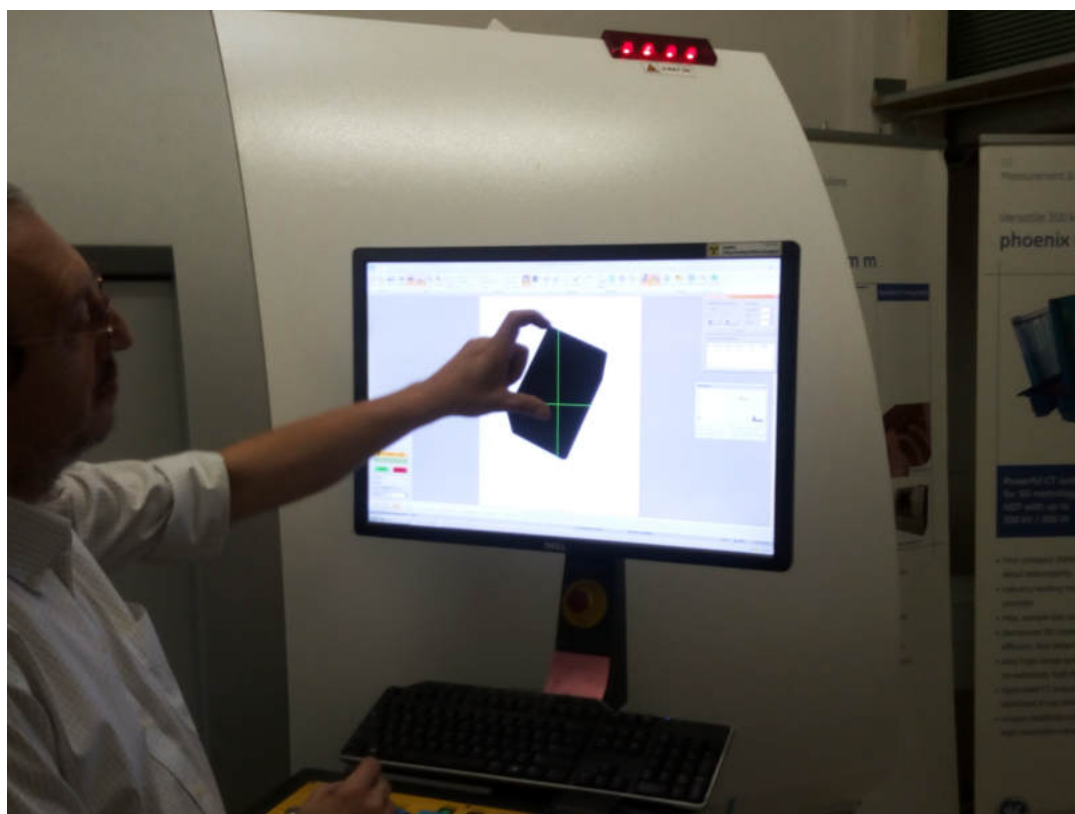


Figura 42: Schema planare semplificato per agevolare la ricerca delle difettologie nella XCT del prisma generato via DMLS. In basso a destra è si osserva l'inciso di riferimento.

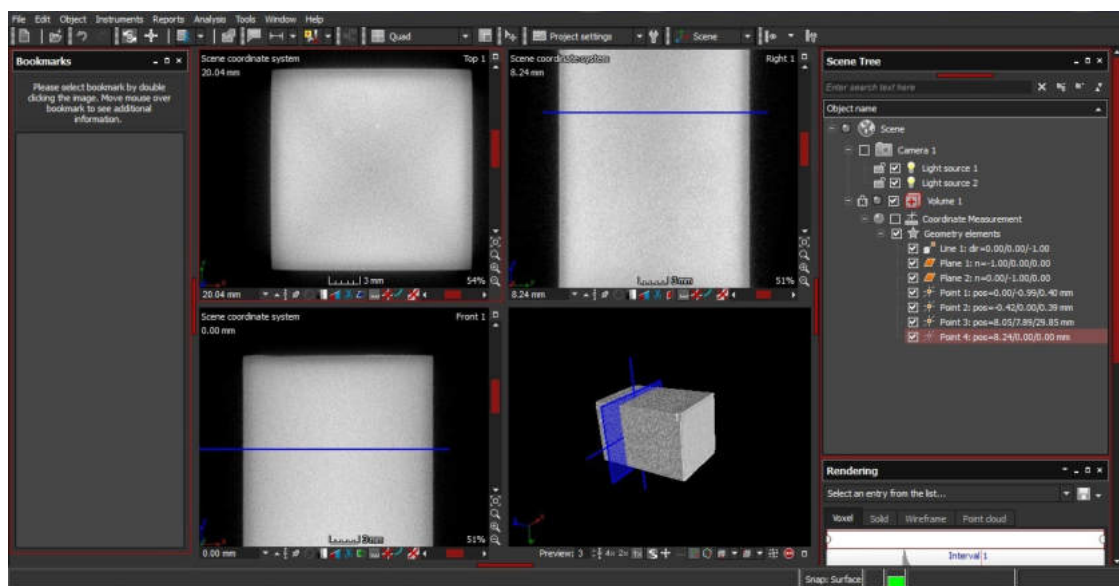


a)

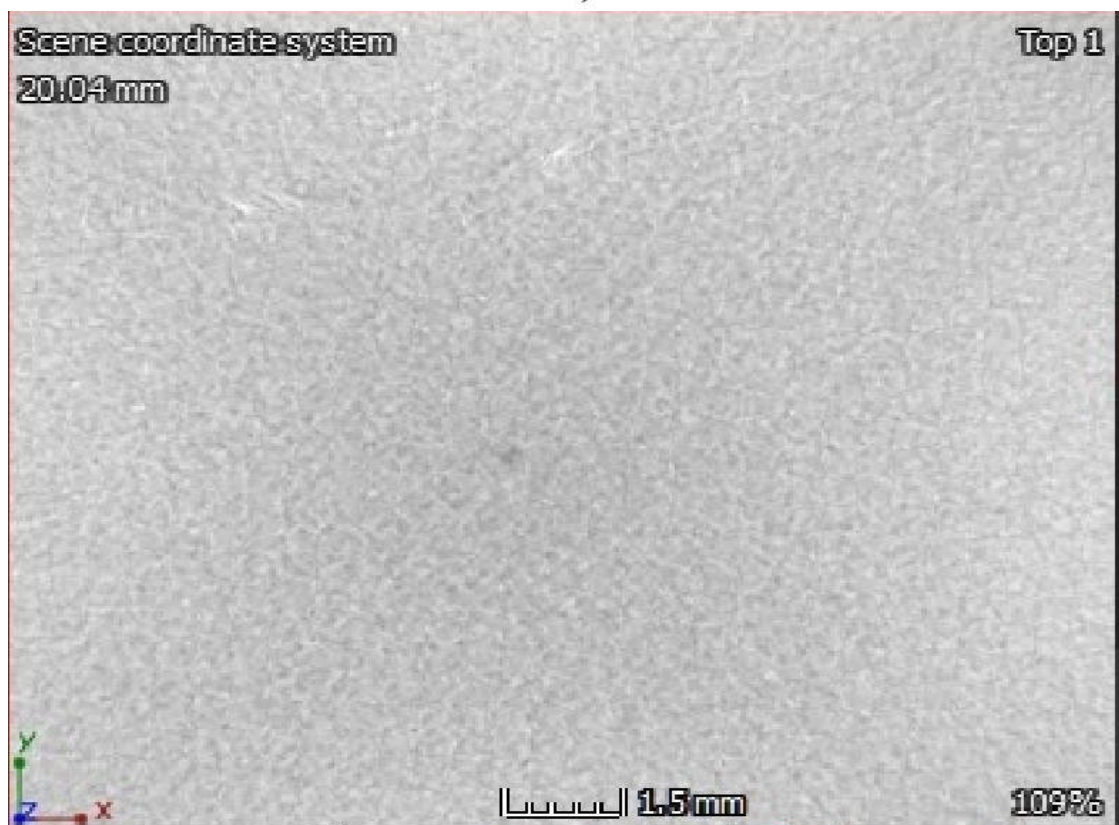


b)

Figura 43: a) Tomografo *Phoenix v|tome|x m* della *GE* in uso presso la *Labormet Due* di Torino;
b) l'operatore osserva a video la XCT del manufatto.

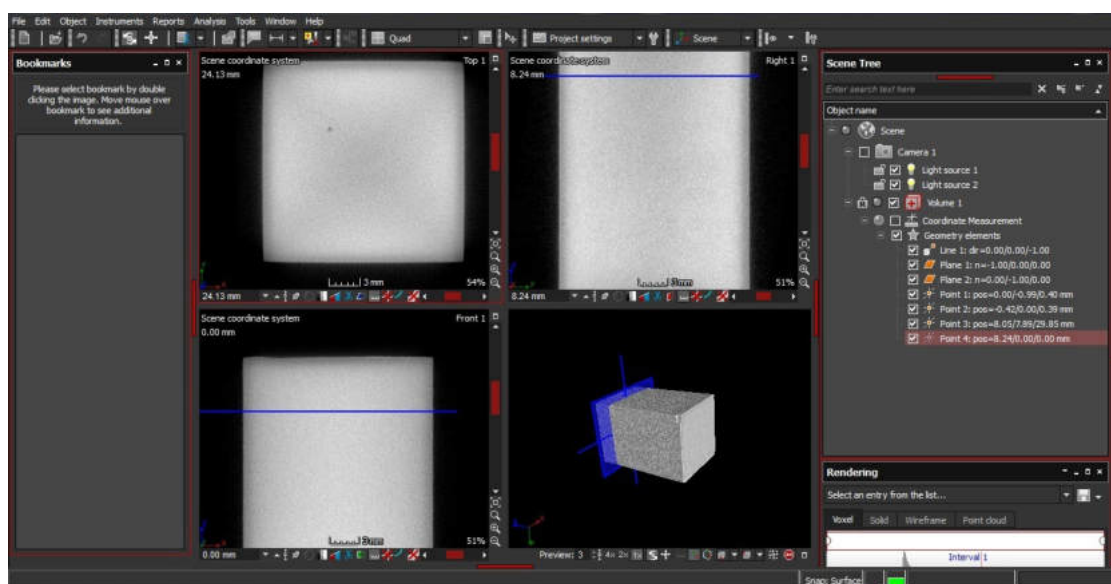


a)

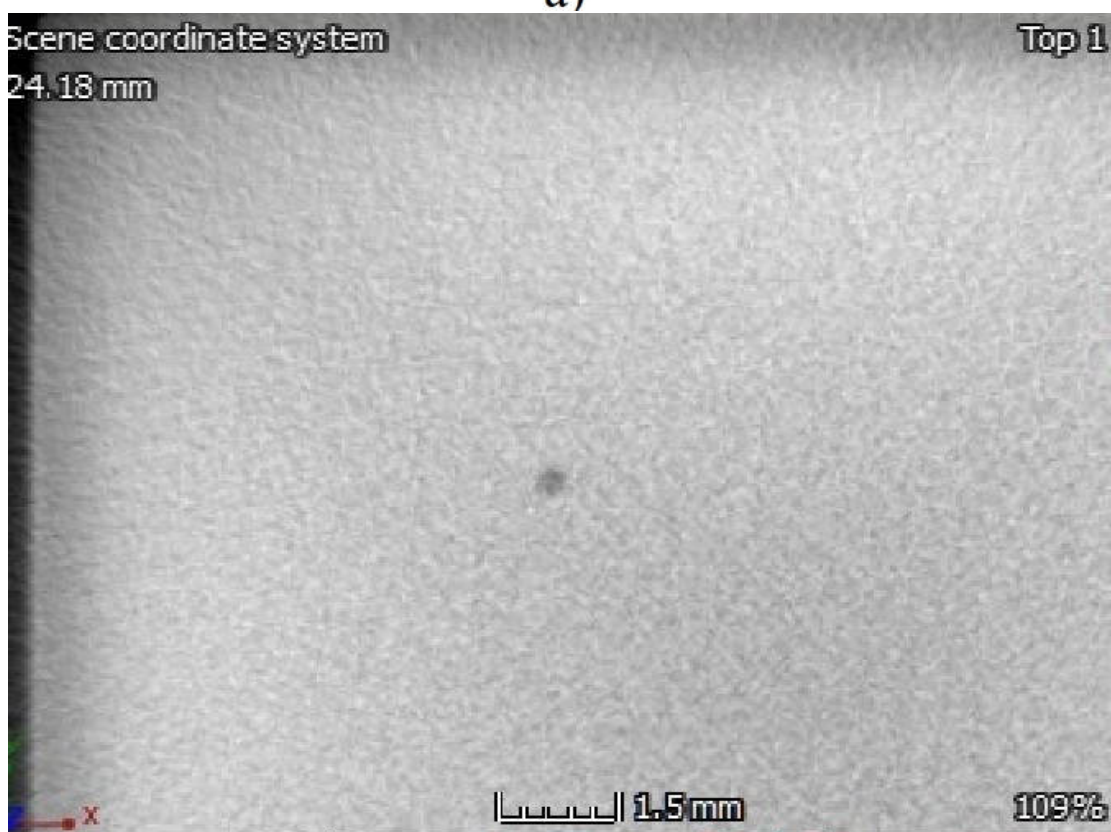


b)

Figura 44: a) XCT del difetto con diametro 0,3 mm inserito ad hoc nel modello CAD a 20 mm dall'intaglio di riferimento. b) Ingrandimento del difetto in a).



a)



b)

Figura 45: a) XCT del difetto con diametro 0,5 mm inserito ad hoc nel modello CAD a 24 mm dall'intaglio di riferimento. b) Ingrandimento del difetto in a).

0.19.2 Ultrasuoni

All'Istituto Italiano della Saldatura (IIS) ho collaborato alla campagna di prove per valutare l'attenuazione strutturale di un blocco campione in Inconel-625 realizzato con la EOS M290, spessore 17 mm, effettuata agli ultrasuoni (Figura 46). Tale campagna è stata realizzata con l'apparecchio *GE - Phasor XS* a cui è stata collegata la sonda *GE-MSEB4* ad onde longitudinali e a doppio cristallo. Come mezzo accoppiante il gel *MATRIX* della *NDT Italiana*. La velocità rilevata è in linea con

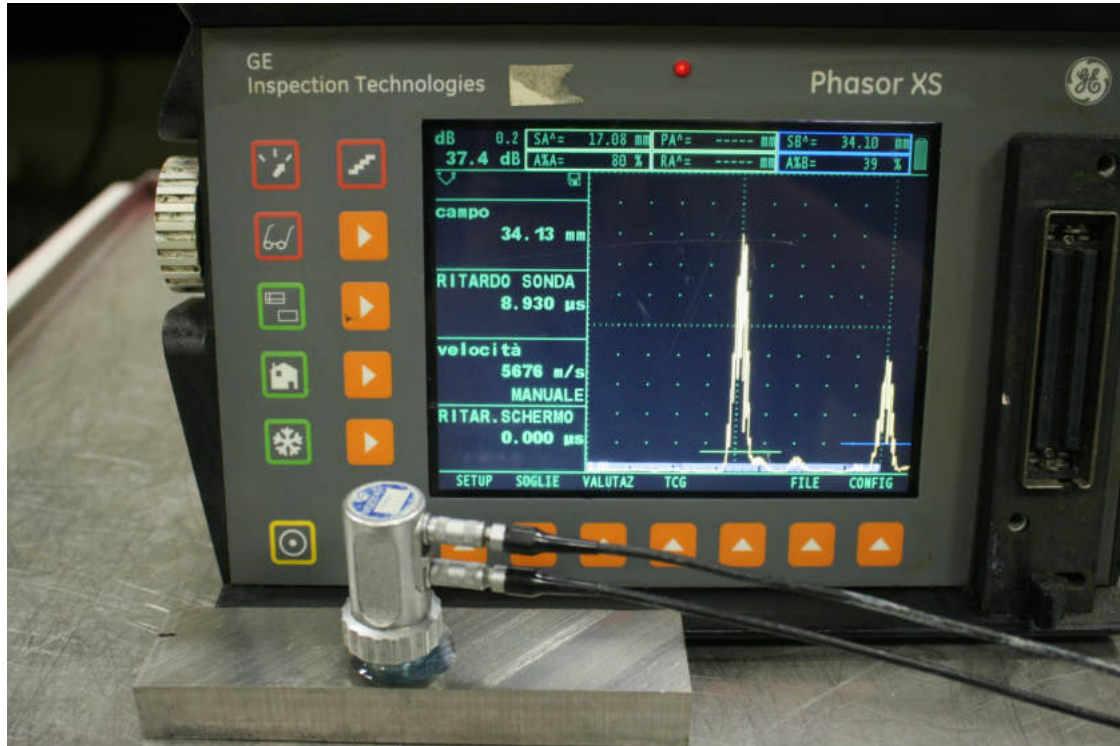


Figura 46: Test NDT ad ultrasuoni su un campione in Inconel 625 svolto all'Istituto Italiano della Saldatura.

i normali valori per le leghe Inconel (circa 5700 m/s). Il pezzo mostra un'attenuazione strutturale di circa 6 dB, quindi è trasparente agli ultrasuoni, questo lo rende acusticamente più vicino a un prodotto ottenuto da laminazione piuttosto che saldatura.

Un ulteriore campione in Inconel-625 è stato prodotto con tecnica DMLS, per verificare l'eventuale anisotropia del materiale. Tale campione è un parallelepipedo retto con base rettangolare 20 mm x 34 mm ed altezza 100 mm. Su un fianco del cuboide a 20 mm dalla base, nella direzione di crescita dei piani, è stato praticato un foro cilindrico con 3 mm di diametro. Per questa campagna di test sono stati impiegati l'apparecchio USM35 e due sonde piane della *General Electric*: la MB2EN da 2 MHz e la MB4SEN da 4 MHz, entrambe di diametro 10 mm Figura 47.

Per valutare l'anisotropia del pezzo sono state effettuate alcune misurazioni agli ultrasuoni con entrambe le sonde, sia in direzione ortogonale che orizzontale, rispetto al senso di crescita dei piani. Per la calibrazione dei tempi di risposta, l'apparecchio per le misurazioni USM35, con il blocco N.1 conforme alla norma EN 12223:1999 E.



Figura 47: Sonde impiegate per rilevare l'anisotropia di un manufatto in Inconel-625.

Per la prima serie di misurazioni è stata adottata la sonda MB4SEN disposta sul campione steso in orizzontale, ovvero con il fascio ultrasonoro in parallelo al verso di crescita dei piani. È stato usato dell'olio come liquido accoppiante. Come si osserva in Figura 49, il modulo Sa che indica la distanza tra la sonda ed il foro misurata agli ultrasuoni è circa 18,55 mm. Il parametro Ha invece indica l'altezza dell'eco in percentuale, la sua misura è circa pari all'80% dello schermo con un'amplificazione di 45 dB. In un secondo tempo il campione è stato ruotato e posto in verticale per posizionare la sonda in modo che il fascio ultrasonico sia perpendicolare al verso di crescita dei piani Figura 50 b). La distanza tra sonda e foro è stata misurata pari a 18,61 mm, l'eco di ritorno a 45 dB non era sufficiente a raggiungere l'80% dell'altezza dello schermo ma solo il 59%. Si è dovuto amplificare il segnale fino a 47,5 dB per far sì che Ha si avvicinasse alla soglia richiesta, Figura 50. Questo indica che il materiale non risulta isotropo: c'è infatti una differenza di 2.5 dB fra le due direzioni indagate.

Per la seconda serie di test è stata adottata la sonda MB2SEN da 2 MHz. Anche in questo caso sono state effettuate due misurazioni ponendo il segnale ultrasonico sia in senso parallelo al verso di crescita dei piani che in senso ortogonale ad esso, Figura 51 e Figura 52. Nel primo caso la sonda ha misurato una distanza Sa di 20,00 mm dal foro con una amplificazione di 48,5 dB; segnale dell'eco di ritorno Ha pari all'83%. Nel successivo test il valore di Sa è sempre 20,00 mm, ma $Ha = 72\%$ con la stessa amplificazione. Perciò è stato necessario aumentare l'eco di ritorno fino alla soglia richiesta: con amplificazione 49,5 dB si ottiene $Ha = 82\%$, come si può osservare in Figura 51 e Figura 52. La sonda MB2SEN invia segnali con una frequenza inferiore rispetto alla prima perciò ha una capacità di penetrazione del segnale superiore. Dalle misurazioni si osserva comunque un'attenuazione, anche se di un solo dB. Quindi, anche in questo caso, il materiale risulta anisotropo.

Infine è stata effettuata una analisi con la sonda CLF-4 17K00M7W da 15 MHz, Figura 48, montata però sullo strumento USM36.

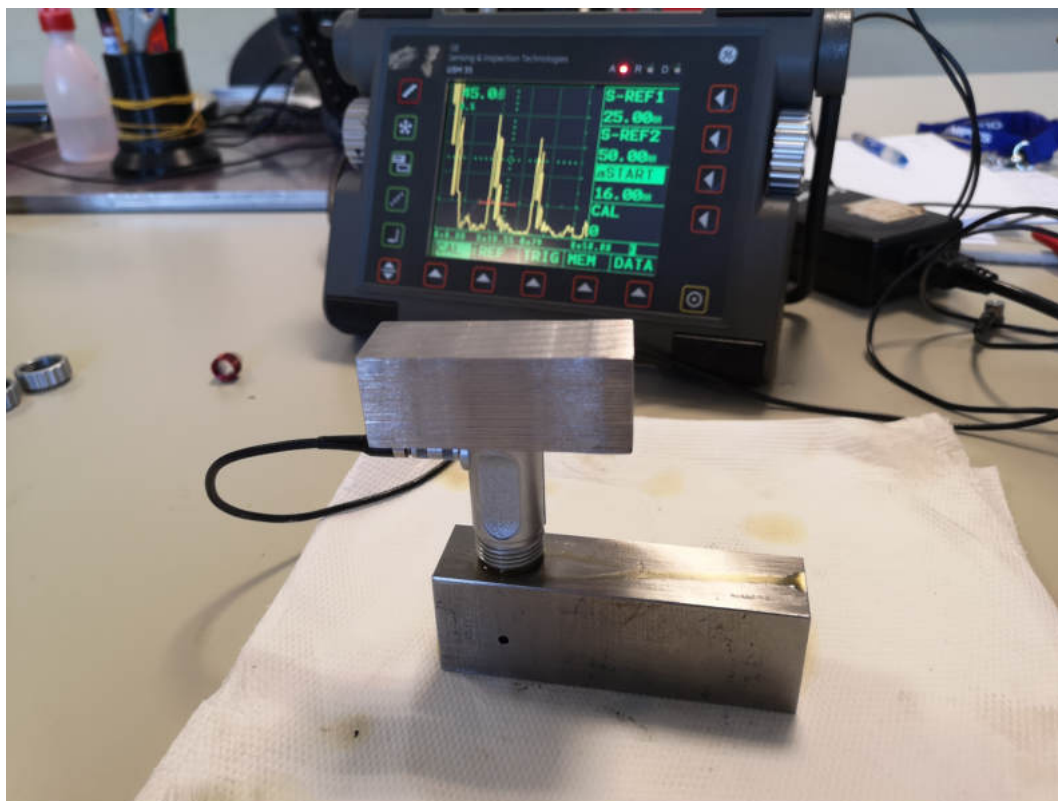
Come si osserva in Figura 53 anche in questo caso la sonda è stata posta in modo che il fascio ultrasonico sia diretto in parallelo al verso di crescita dei piani del campione. La sonda rileva, ad una distanza Sa di 18,54 mm dal foro, il segnale dell'eco di ritorno (qui indicato con "A%A") pari al 79% dello schermo, con una



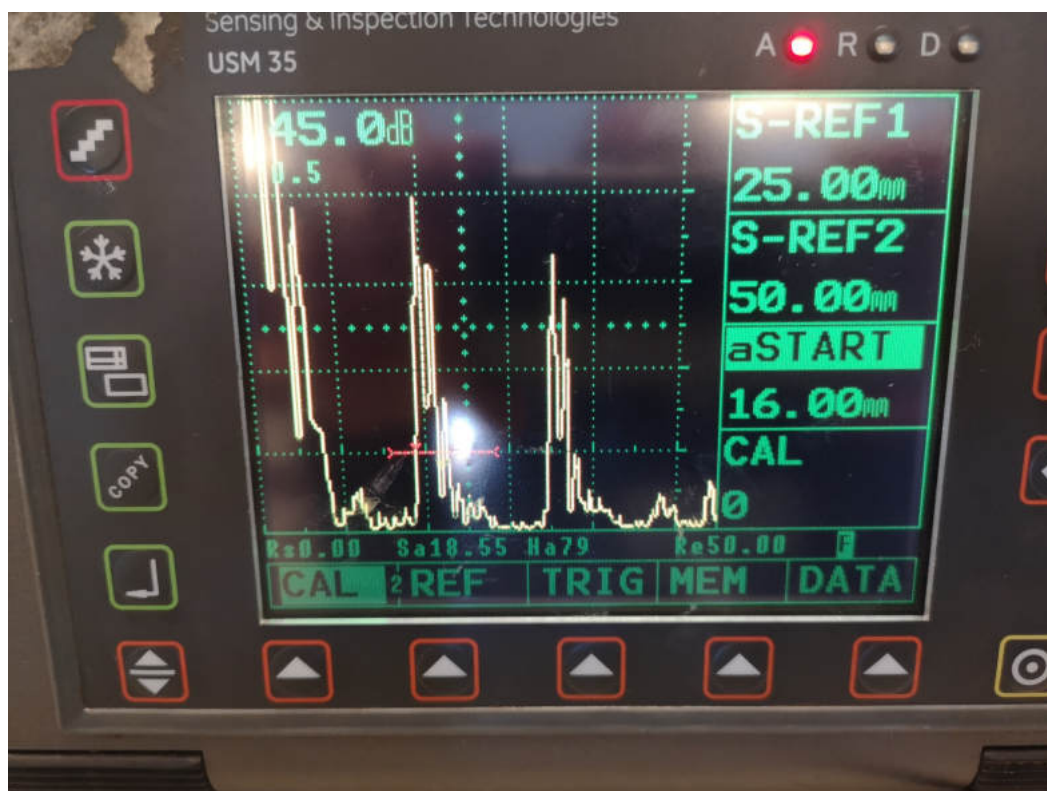
Figura 48: Sonda CLF-4 17K00M7W da 15 MHz.

amplificazione di 64,5 dB. Successivamente la sonda è stata posizionata in modo tale che il fascio ultrasonico fosse diretto ortogonalmente al verso di crescita dei piani. È stata rilevata una distanza S_a di 18,57 mm dal foro, l'eco di ritorno è pari al 68% dello schermo con una amplificazione di 64,5 dB. Si è dovuto quindi amplificare il segnale, fino ad arrivare alla soglia del 78%, con un'amplificazione pari a 65,5 dB, Figura 54 b). Anche in questo caso si ha un'attenuazione di 1 dB tra i due test, rilevando l'anisotropia del materiale.

In conclusione la campagna di test agli ultrasuoni ha rilevato che il materiale è anisotropo: c'è sempre una attenuazione del segnale di ritorno nei due sensi d'ispezione (sia ortogonale che parallelo al senso di crescita dei piani) anche se minima. Il materiale mostra una minore attenuazione del segnale con orientamento del fascio in parallelo alla direzione di crescita del processo di fabbricazione.

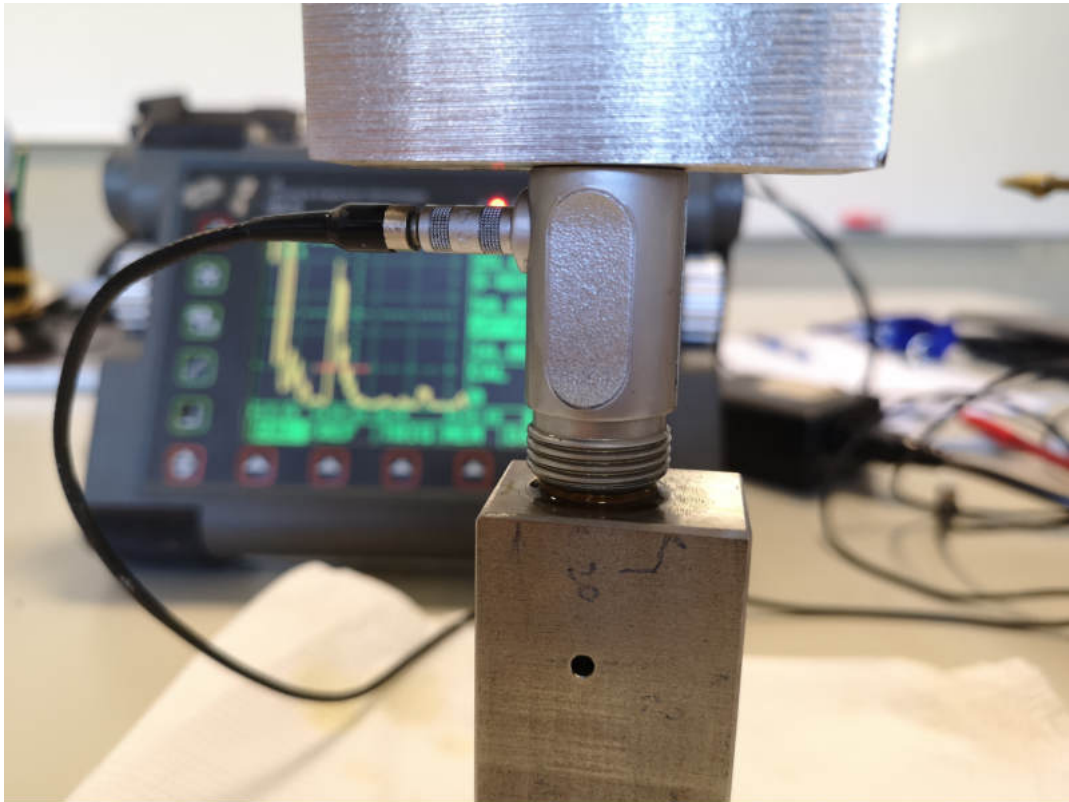


a)



b)

Figura 49: a) Campione sottoposto a test con ultrasuoni. Sonda MB4SEN e fascio diretto in parallelo alla crescita dei piani b) rilevazione dell'eco.



a)

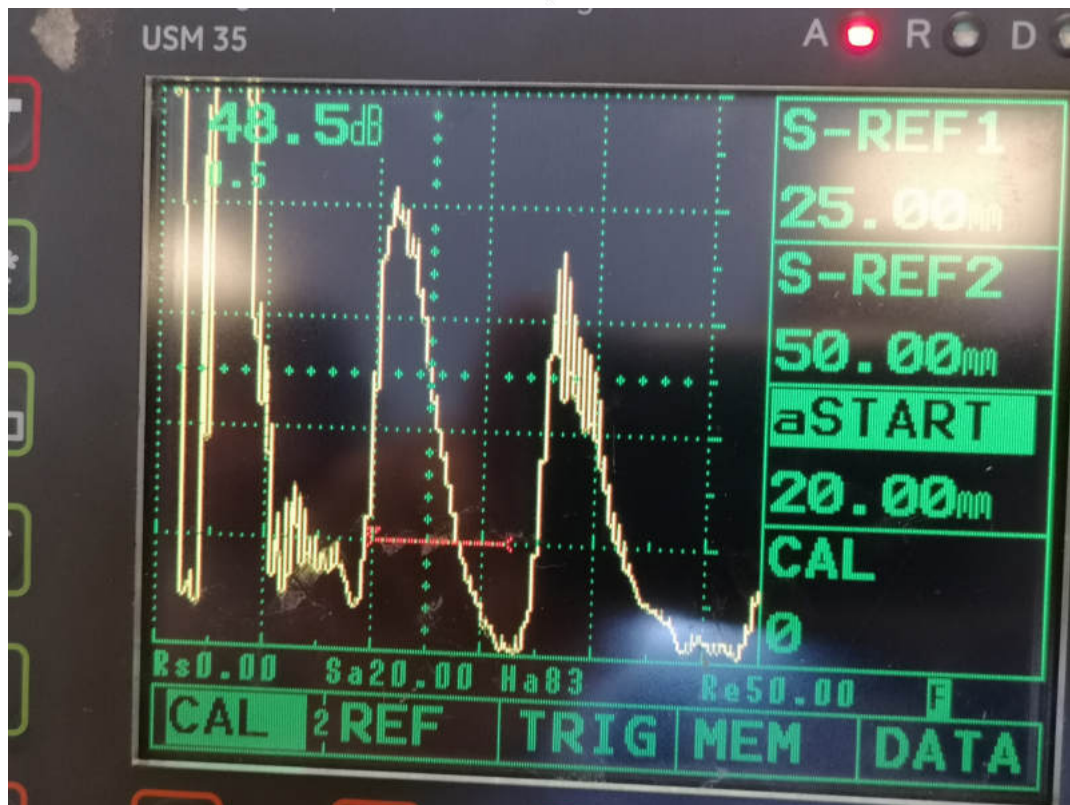


b)

Figura 50: a) Campione sottoposto a test con ultrasuoni. Sonda MB4SEN e fascio disposto in senso ortogonale alla crescita dei piani b) rilevazione dell'eco.



a)



b)

Figura 51: a) Campione sottoposto a test con ultrasuoni. Sonda MB2SEN e fascio diretto in parallelo alla crescita dei piani b) rilevazione dell'eco.

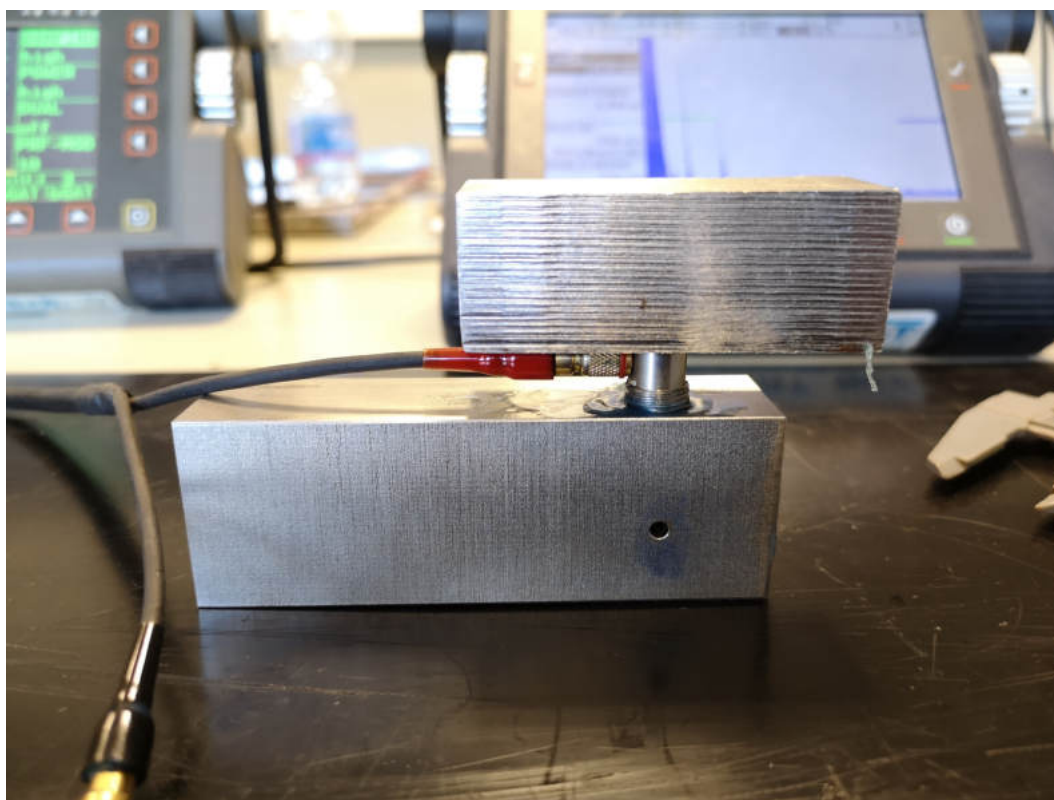


a)

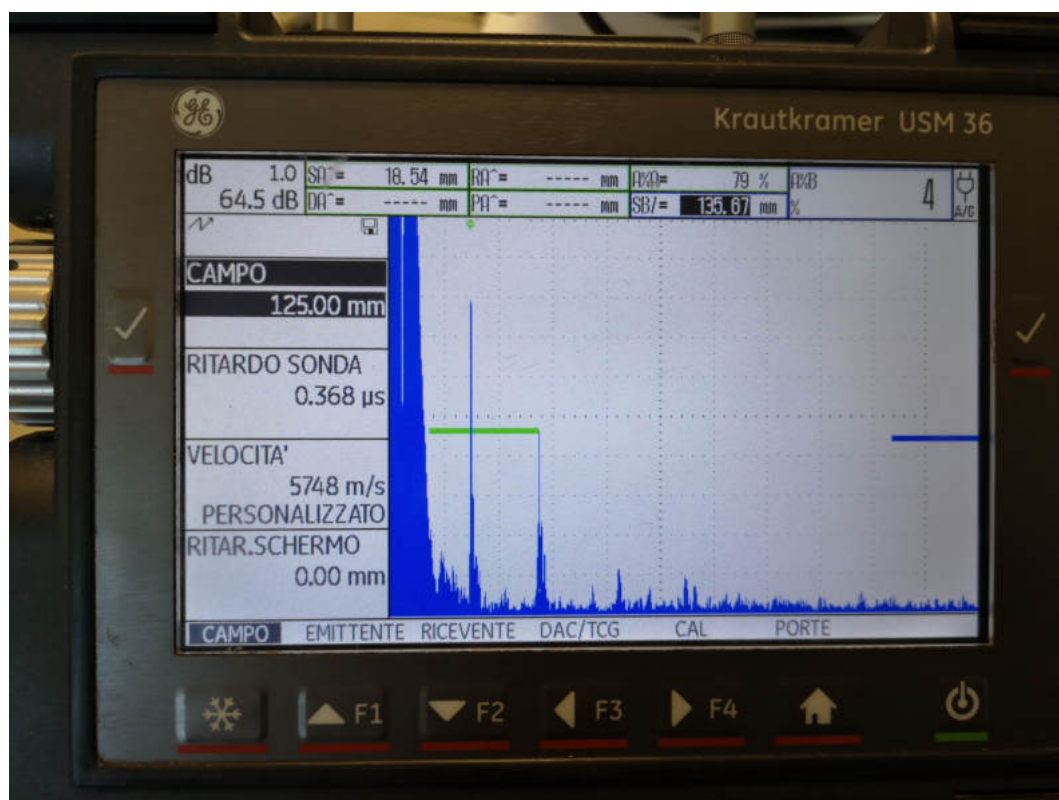


b)

Figura 52: a) Campione sottoposto a test con ultrasuoni. Sonda MB2SEN e fascio disposto in senso ortogonale alla crescita dei piani b) rilevazione dell'eco.

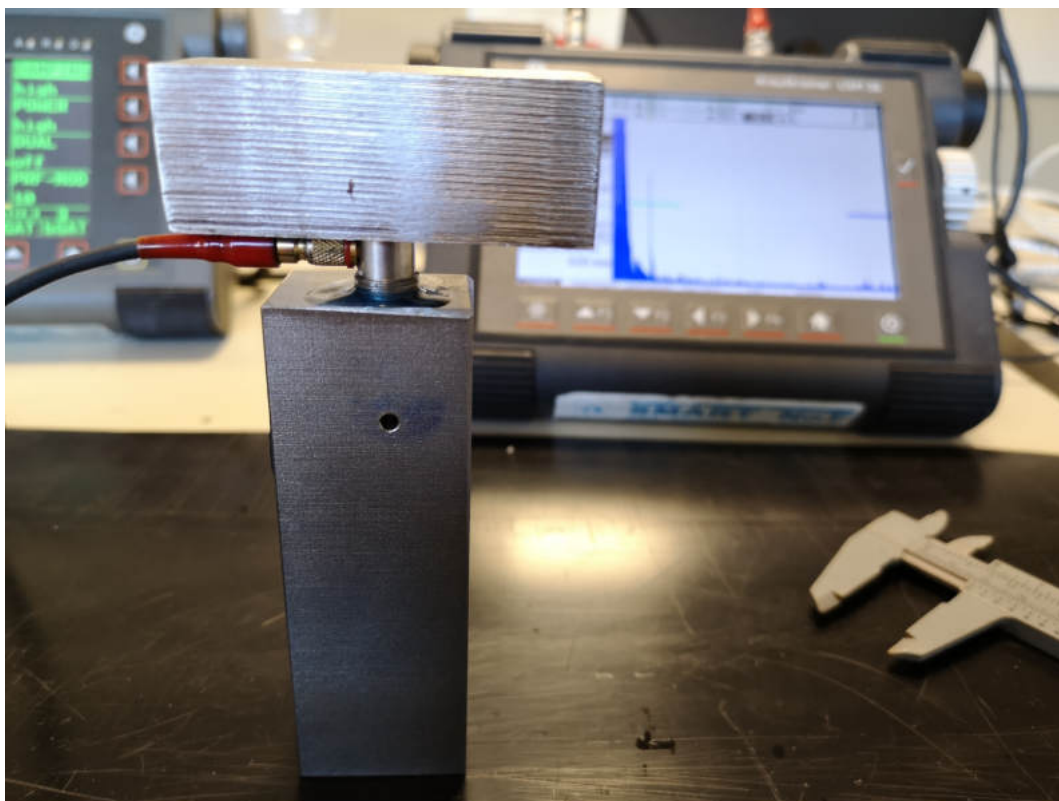


a)

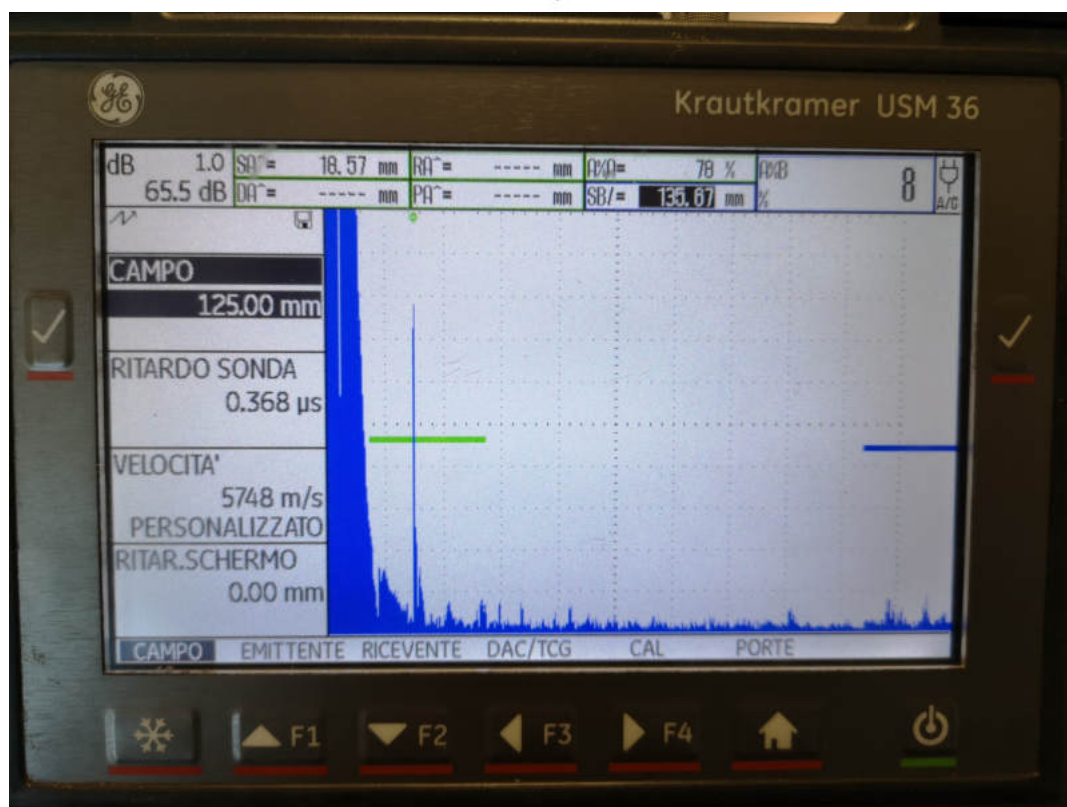


b)

Figura 53: a) Campione sottoposto a test con ultrasuoni. Sonda CLF-4 17K00M7W e fascio diretto in parallelo alla crescita dei piani b) rilevazione dell'eco.



a)



b)

Figura 54: a) Campione sottoposto a test con ultrasuoni. Sonda CLF-4 17K00M7W e fascio disposto in senso ortogonale alla crescita dei piani b) rilevazione dell'eco.

0.19.3 Prova di trazione

Dai risultati di una prova di trazione possono essere ottenute diverse informazioni e proprietà del manufatto oggetto di test: la sua resistenza allo snervamento (R_p), il suo carico di rottura (R_m) e la sua percentuale di allungamento a frattura (A_t).

Gli standard che definiscono le modalità di esecuzione delle prove per i materiali metallici a temperatura ambiente sono regolati da norme specifiche: in Europa il riferimento normativo è fissato dallo standard EN ISO 6892-1:2016 che precisa le modalità di prova e stabilisce le caratteristiche meccaniche che si determinano; la sua omologa negli U.S.A. è la *ASTM E8/E8M - 16a*.

Presso l'Istituto Italiano della Saldatura (IIS) ho collaborato all'esecuzione di alcune prove di trazione [136]. È stato realizzato un blocco in Inconel-625 via DMLS, Figura 55 da cui sono stati prelevati due saggi da sottoporre ai test.

Le prove sono state eseguite nel rispetto dello standard ASTM E8 / E8M - 16a, è stata utilizzata per lo scopo la *Zwick Z600*, i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 6

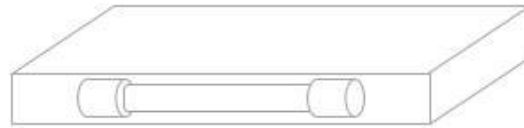


Figura 55: Schema rappresentativo del processo di estrazione dei saggi per la prova di trazione.

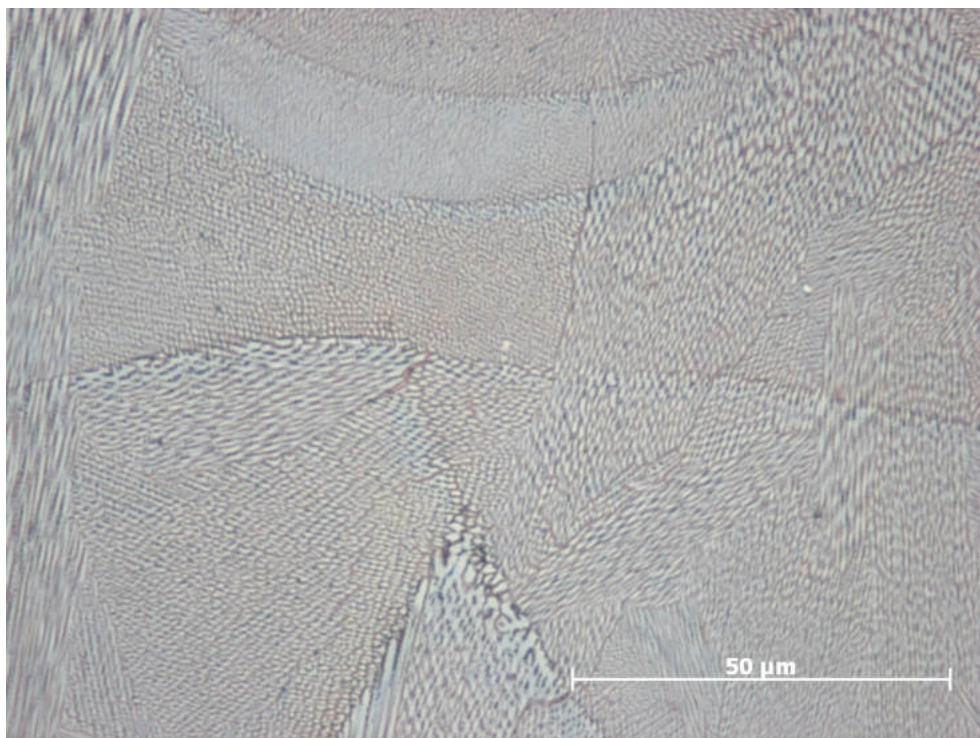
<i>Saggio</i>	<i>Posizione</i>	<i>diametro</i> <i>mm</i>	R_m <i>MPa</i>	$R_{p0.2}$ <i>MPa</i>	A_t %
T_1	Piano X-Y, $T/2$	9,01	1000	757	37,0
T_2	Piano X-Y, $T/2$	8,98	1006	757	34,0

Tabella 6: Risultati ottenuti dalla prova di trazione su due saggi in Inconel 625 prelevati da un blocco di Inconel-625 generato DMLS presso l'Istituto Italiano della Saldatura.

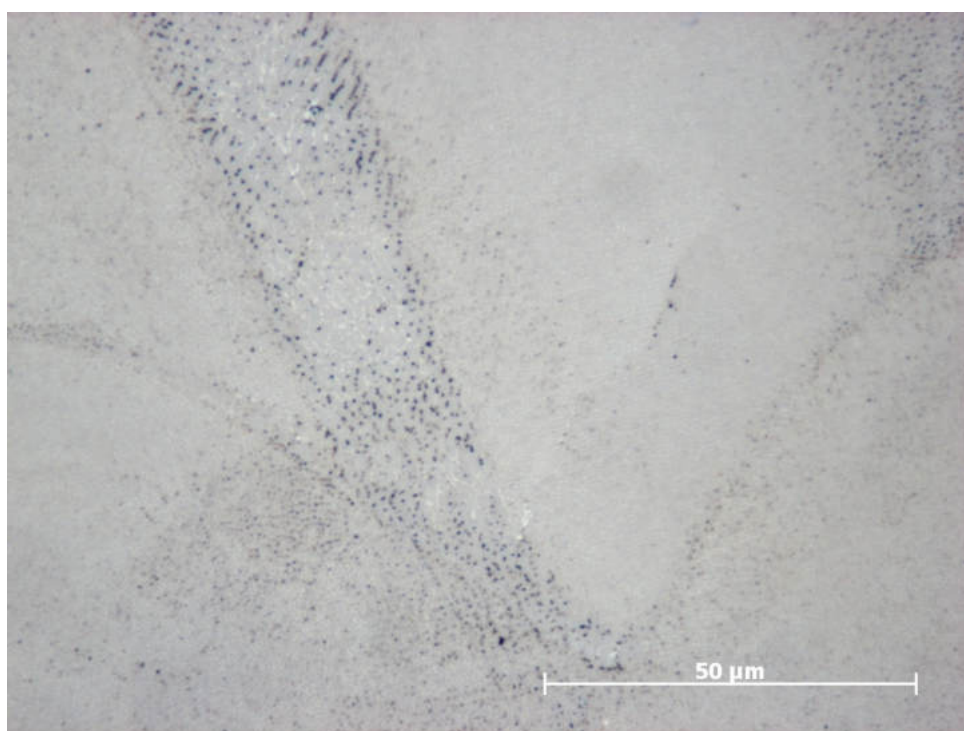
0.19.4 Indagini microstrutturali

Le proprietà meccaniche dei prodotti realizzati con tecniche additive dipendono fortemente dalle caratteristiche del materiale base impiegato, dalla metodologia di sviluppo adottata e dai suoi parametri. Esse sono essenziali per stabilire l'idoneità del manufatto per il campo d'impiego a cui è destinato.

Ho collaborato con lo staff dell'I.I.S. anche ad un'indagine micrografica su manufatti in Inconel-625. I campioni da analizzare sono stati realizzati mediante tecnica LPBF. Come possiamo osservare in Figura 56, la microstruttura dei manufatti in Inconel-625 è caratterizzata dalla presenza di diffuse dendriti colonnari.



a)



b)

Figura 56: Micrografie di un manufatto in Inconel-625 generato DMLS, realizzato presso l'Istituto Italiano della Saldatura.

0.20 Risultati

0.20.1 Tomografia assiale computerizzata

Dall'indagine svolta in collaborazione con l'I.I.S. sulla μ CT sviluppata presso la *Labormet 2* di Torino, è emerso che l'Inconel-625 è un materiale molto denso: è stato possibile rilevare difetti a partire da un diametro minimo di 0.3 mm.

0.20.2 Ultrasuoni

La campagna di test agli ultrasuoni, a cui ho partecipato in collaborazione con l'I.I.S., ha rilevato che l'Inconel-625 presenta un'attenuazione strutturale di circa 6 dB ed è quindi trasparente agli ultrasuoni, questo lo rende acusticamente più vicino a un prodotto ottenuto da laminazione piuttosto che da saldatura. Il materiale è risultato anisotropo e quindi ha una bassa saldabilità: c'è sempre una attenuazione del segnale di ritorno nei due sensi d'ispezione (sia ortogonale che parallelo al senso di crescita dei piani) anche se minima. Il materiale mostra una minore attenuazione del segnale con orientamento del fascio in parallelo alla direzione di crescita del processo di fabbricazione.

0.20.3 Prove di trazione

Dai risultati ottenuti e schematizzati in Tabella 6 si osserva che il carico di rottura misurato su entrambi i saggi è molto simile (1000 MPa per il primo e 1006 MPa per il secondo). Entrambi i valori sono molto superiori a quello minimo stabilito dalla norma ASTM F3056-14E1 [121] per prodotti generati con tecniche additive a letto di polveri in Inconel-625, ossia 485 MPa per tutte le direzioni di prelievo. Il carico di rottura di ottenuto per entrambi i provini rispetta anche quanto stabilito dallo standard americano ASTM B443-00 [120] che stabilisce in 827 MPa il valore minimo per i prodotti da laminazione a freddo tradizionali in Inconel-625.

La misura della resistenza allo snervamento è risultata identica per entrambi i campioni, ovvero 757 MPa. Tale valore rispetta le specifiche previste dalle norme ASTM sia per manufatti realizzati da processi additivi PBF, sia per laminati a freddo, che stabiliscono la soglia in 275 MPa e 414 MPa, rispettivamente.

Anche per l'allungamento a rottura i risultati di entrambi i test sono superiori alle soglie imposte da entrambe le norme ASTM sopra citate che stabiliscono un allungamento di rottura percentuale minimo pari al 30%: per il primo saggio tale risultato è pari al 37%, per il secondo saggio è pari al 34%.

0.20.4 Indagini microstrutturali

Dalle micrografie effettuate risulta che la microstruttura dei provini in Inconel-625 è caratterizzata da diverse dendriti colonnari.

Risultati omologhi a quelli ottenuti dalle indagini che ho svolto in collaborazione con lo staff dell'I.I.S., sono stati riscontrati da numerosi ricercatori, tra gli altri anche il team di *Gonzalez* [123] che ha studiato alcune proprietà meccaniche,

quali il carico di rottura, la resistenza allo snervamento e l'allungamento percentuale a rottura di manufatti realizzati con tecniche additive diverse, in Inconel-625. *Gonzalez et al.* hanno realizzato numerosi manufatti attraverso metodi SFF differenti per studiarne le caratteristiche meccaniche. Tra i metodi di fabbricazione additiva analizzati sono presenti due tecniche, entrambe a letto di polvere, ma con diversa sorgente: la fusione laser a letto di polvere (LPBF) e la fusione da fascio di elettroni a letto di polvere (EPBF). I campioni sono stati generati con diverse orientazioni, alcuni lungo il piano $x - y$, altri lungo l'asse z . I prodotti finiti sono stati sottoposti ad un processo di pressatura isostatica a caldo (HIP). Pure i risultati ottenuti da *Gonzalez et al.* [123] con entrambe le metodologie additive hanno soddisfatto i requisiti minimi stabiliti nello standard ASTM F3056-14 [121]: i manufatti hanno caratteristiche paragonabili a quelle dell'Inconel-625 laminato a freddo. Tuttavia per i campioni accresciuti lungo l'asse z , solo con la tecnica additiva con sorgente laser viene rispettata la soglia minima suggerita dalla norma sopra citata. Anche i risultati delle analisi relative alla resistenza allo snervamento sui campioni realizzati da *Gonzalez et al.* rispettano i requisiti minimi suggeriti nella ASTM F3056-14 [121]. In relazione ai risultati circa l'allungamento a rottura, tutti i provini sviluppati lungo la direzione x superano la soglia minima del 30% suggerita nella norma ASTM F3056-14, mentre nel caso dei campioni accresciuti lungo l'asse z , la soglia minima viene rispettata solo per quelli realizzati via LPBF.

Il gruppo di ricerca di *Poulin* [124] ha analizzato le caratteristiche tensionali e la propagazione a fatica della fessura di provini in Inconel-625 sviluppato con tecniche LPBF, esaminando l'influenza che può avere l'angolazione di accrescimento nei diversi campioni e quella che possono avere i processi post-trattamento. Ad eccezione dell'allungamento a rottura, le proprietà meccaniche tensionali dell'Inconel-625 generato LPBF, sono superiori a quelle dell'Inconel-625 da lavorazione e sono debolmente influenzate dall'angolazione di accrescimento. Il processo di HIP, post lavorazione, provoca una diminuzione sia del carico di rottura sia della resistenza allo snervamento ma potenzia lievemente l'allungamento a rottura. Le prove di propagazione del difetto a fatica hanno mostrato una certa dipendenza, sia del fattore di intensificazione delle tensioni di soglia ΔK_{th} , sia della bassa velocità di propagazione, in funzione dell'angolazione con cui sono stati sviluppati i campioni: il risultato peggiore è stato riscontrato nei provini accresciuti con angolazione di 90° , il migliore per quelli con angolazione nulla, mentre per quelli con angolo di 45° , si è osservato un comportamento mediano. Il trattamento di pressatura isostatica a caldo post-lavorazione agisce, sia sulla dimensione che sulla quantità delle porosità, rimuovendo le differenze indotte a causa delle diverse angolazioni di accrescimento. La velocità di propagazione a fatica della fessura nei provini analizzati, non presenta variazioni rispetto al post-trattamento, per ogni angolo di inclinazione osservato.

Campioni in Inconel-625, realizzati con tecnica *Laser Powder Bed Fusion*, sono stati sottoposti ad indagini microstrutturali ed a prove tensionali, sia "*as built*" che successivamente a processi post-fabbricazione [128, 129]. I manufatti esaminati hanno subito processi di ricristallizzazione, di pressatura isostatica a caldo, di ricottura di solubilizzazione a basse temperature e di ricottura distensiva delle tensioni residue. Le prove tensionali sono state effettuate a caldo (760°C).

Il confronto tra i risultati delle prove sui manufatti "*as built*" e quelli trattati

evidenza, per i primi, un carico di rottura maggiore, una marcata anisotropia rispetto all'angolazione di sviluppo e minor allungamento.

Dalle prove tensionali eseguite alla temperatura di 760°C è emerso che l'Inconel-625, generato da processo *Laser Powder Bed Fusion*, presenta una variazione nella stechiometria dei carburi e una fragilizzazione. Gli autori hanno attribuito quest'ultima alla precipitazione dei carburi a bordo grano. A conferma di questa tesi, già nel 1997, *Gordon* [130] aveva individuato la variazione stechiometrica dei carburi come possibile causa di fragilizzazione.

I processi post-lavorazione rendono equiassica la microstruttura colonnare a grani allungati lungo la direzione di accrescimento; questo a discapito della grandezza dei grani. Maggiore è la temperatura con cui viene eseguito il processo post-lavorazione, più la dimensione dei grani aumenta e la microstruttura diventa equiassica.

0.21 Discussione

Le prove risultanti dalla tomografica assiale computerizzata, hanno permesso di rilevare difettologie costruite ad arte nel blocco campione in lega di nichel, solo per dimensioni del difetto maggiori di 0.3 mm.

Dalla prova non distruttiva svolta sui campioni in Inconel-625, ovvero dall'ispezione agli ultrasuoni, è emerso che il materiale mostra un'attenuazione strutturale di circa 6 dB, quindi risulta trasparente agli ultrasuoni, questo lo rende acusticamente più vicino a un prodotto realizzato da laminazione piuttosto che da saldatura. Il materiale è anisotropo, sia lungo la direzione di crescita dei piani che in ortogonale alla stessa; quindi ha una scarsa saldabilità.

Dalle analisi micrografiche sui campioni in lega di nichel sono evidenti diverse e diffuse dendriti colonnari; in linea con i risultati ottenuti in numerose ricerche presenti in letteratura [?, 124, 128, 129]. Dai risultati ottenuti con le prove di trazione circa il carico di rottura, la resistenza allo snervamento e allungamento percentuale a rottura, è emerso che il materiale rispetta tutti i valori minimi stabiliti dagli standard delle norme ASTM F3056-14E1 [121] e B443-00 [120], rispettivamente, per prodotti generati con tecniche additive a letto di polveri in Inconel-625 e per prodotti da laminazione a freddo tradizionali nello stesso materiale. Questo rende i manufatti in Inconel-625 generati con tecnica *Laser Powder Bed Fusion* - LPBF, idonei all'impiego nel campo industriale.

Prove sperimentali sul titanio grado 2

0.22 Materiali e metodi

Tra i materiali utilizzati normalmente nelle applicazioni biomedicali, figura da tempo il titanio grado 2 che, grazie alle sue caratteristiche, quali l'elevata biotollerabilità, la significativa resistenza alla corrosione e la ragguardevole durezza rappresenta uno dei materiali da sempre più apprezzati ed utilizzati in particolare in ambito dentistico e ortodontico.

Tra le nuove tecnologie di fabbricazione, spiccano oggi le tecniche *Solid Free-form Fabrication* - SFF. Grazie alla loro notevole versatilità è possibile realizzare manufatti personalizzati, rilevando direttamente dalla morfologia del paziente un "calco" digitale in formato tridimensionale mediante *Reverse Engineering* - RE (ad esempio l'impronta 3D dell'apparato dentale del paziente) per poi sezionarlo con opportuni software ed in ultimo realizzarlo fisicamente con un macchinario AM.

Per questi motivi, in questa tesi sono stati confrontati campioni ottenuti tramite un processo di fusione classica, con altrettanti manufatti realizzati in *additive*, generati con la M290 della EOS che utilizza la tecnica *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS a letto di polveri, al fine di valutare se i campioni SFF creati con la tecnica DMLS rispondano alle caratteristiche necessarie per creare protesi mobili e corone dentali.

Come materiale base per i campioni realizzati tramite fusione (fusione ad induzione in crogiuolo, atmosfera protetta da argon), sono state impiegate barre cilindriche di Ti Cp, mentre per gli esemplari ottenuti tramite processo SLM sono state adottate polveri dello stesso materiale.

Con il processo di fusione sono stati realizzati: un blocchetto rettangolare di lunghezza 12 mm e larghezza 5 mm per simulare lo scheletrato, Figura 57; una corona da 8mm x 8mm di spessore 1 mm, Figura 58.

Con lo stesso fine sono stati creati presso la EOS due campioni in TiCp: per rappresentare il ponte dentale un cuboide pieno, altezza 20 mm e base quadrata di 10 mm; per rappresentare la corona un cilindrico vuoto di altezza 20 mm, diametro massimo 7 mm e spessore 1 mm, Figura 59. Per le polveri di TiCp la EOS M290 impiega una distanza tra gli strati è di 30 μm ; atmosfera protetta da argon; laser fibra Yb (itterbio), lunghezza d'onda 1060÷1100 [nm]; funzionamento in potenza continua (massimo 400 W); volume della camera di costruzione 250x250x325 [mm³]. I campioni generati DMLS, una volta realizzati sono stati sottoposti ad un procedimento di sabbiatura con sfere di ceramica a 4 bar.



Figura 57: Blocchetto rettangolare ottenuto da un processo di fusione classico. Si osservano diverse e numerose porosità superficiali.



a)



b)

Figura 58: a) Corona dentale ottenuta con un processo di fusione classico vista da due angolazioni diverse. Si nota l'elevata rugosità superficiale.

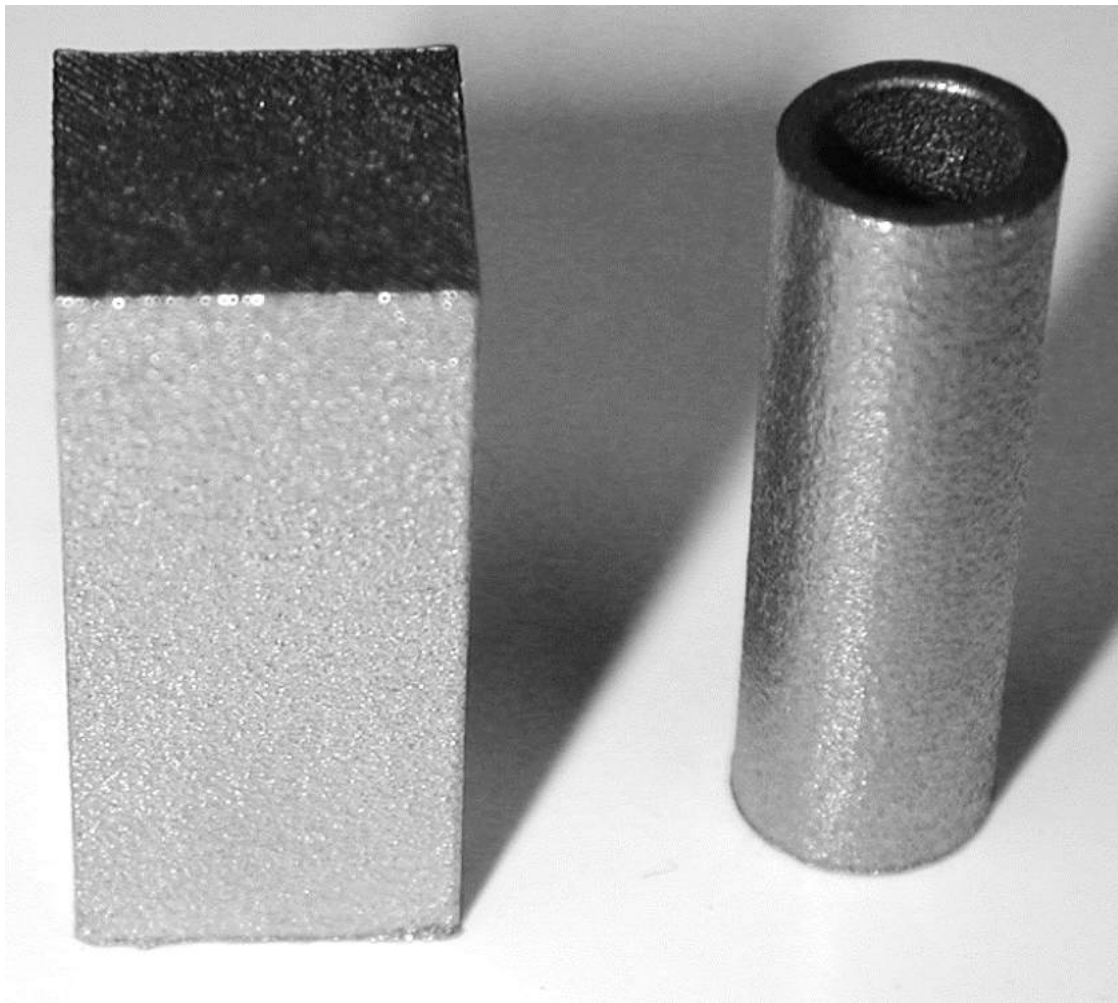


Figura 59: Campioni generati DMLS con la EOS M290 il cuboide per simulare un ponte dentale, il cilindro cavo per simulare una corona.

0.23 Discussione

0.23.1 Analisi superficiale dei campioni in titanio grado 2

Sui campioni realizzati in titanio grado due sono stati effettuate diverse indagini.

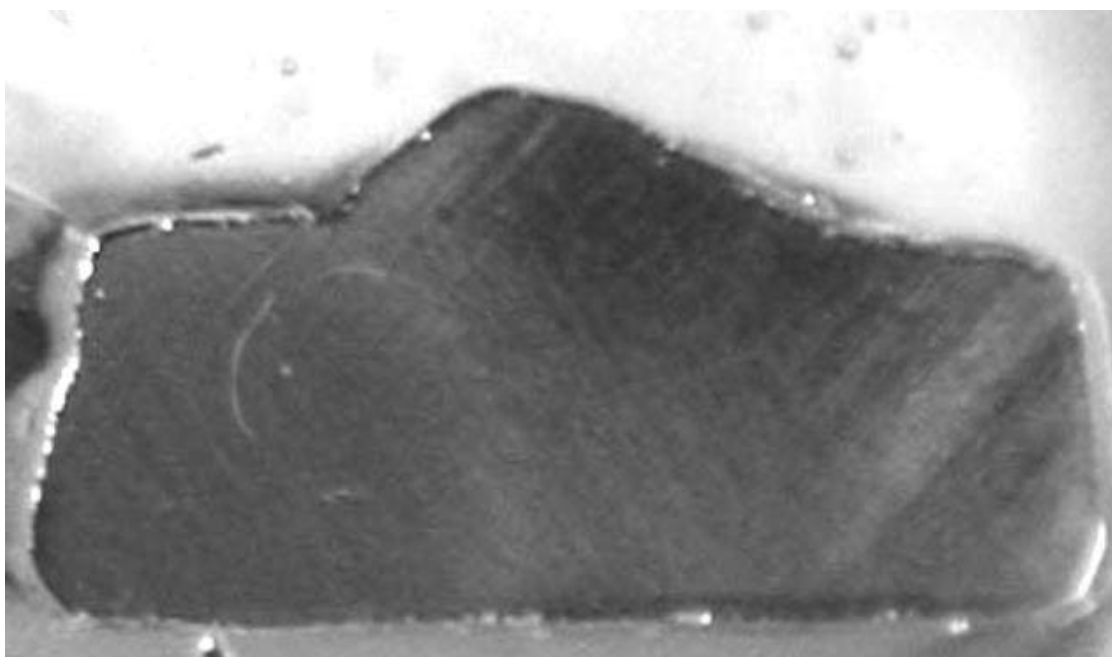
Per analizzare superficialmente le strutture, i quattro campioni in titanio grado 2 oggetto di questa tesi, sono stati sezionati. Il blocchetto e la corona ottenuti con la fusione sono stati sezionati a metà longitudinalmente, Figura 60. Si può osservare ad occhio nudo, in particolare sulla corona, Figura 60-b), la presenza di numerose porosità di grandi e piccole dimensioni. Il cuboide generato tramite processo DMLS è stato sezionato a metà in senso longitudinale ed una delle due metà ulteriormente sezionata sul piano sagittale; infine il cilindro cavo è stato sezionato a metà longitudinalmente, Figura 61.

Per poter valutare la microstruttura, ogni campione sezionato è stato lucidato a specchio ed è stato sottoposto ad attacco superficiale con Kroll (etchant 192 ASTM E407-07[26]): ovvero 1 ml HF, 2 ml HNO₃, 100 ml H₂O. Per le tempistiche e le modalità di attacco sono state seguite le indicazioni contenute nella norma sopracitata; per i macro attacchi è stata seguita la normativa ASTM E 340-15 [27].

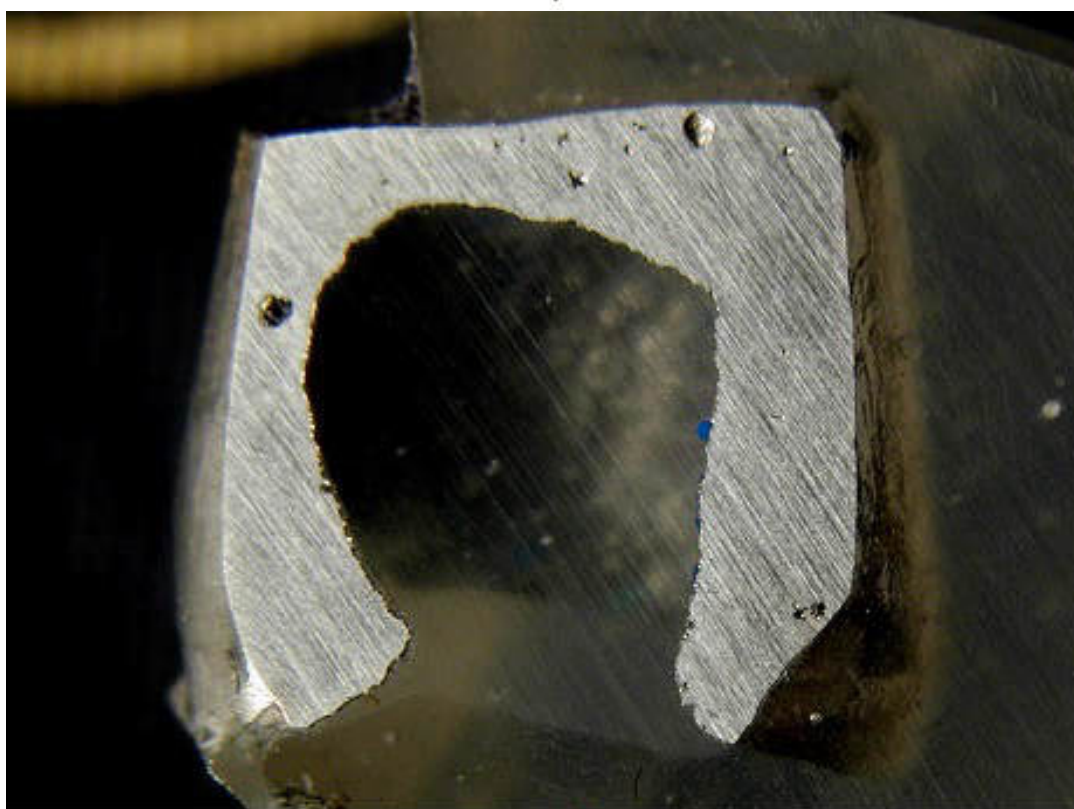
Al fine di osservare e valutare la microstruttura, è stata utilizzato il microscopio metallografico *MATALLOPLAN LEITZ* con ottica planare ed illuminazione a riflessione in campo chiaro. Il microscopio metallografico è corredato da un microduremetro C per determinare la microdurezza Vickers, significativa delle proprietà meccaniche. Le microdurezze Vickers sono state ottenute con un carico di 50gf (490.5×10^{-3} N), mantenuto per 10 secondi. Le immagini sono state acquisite mediante la telecamera montata sull'apparecchio ed analizzate mediante il software *LEICA QWIN* in dotazione al laboratorio. In Figura 62 è visibile la macrostruttura a grani grossolani del blocchetto ottenuto da fusione classica in cui si osservano grani equiassici di dimensioni diverse. Dalla Figura 71.a) si nota che la struttura del blocchetto fuso non è omogenea ma cambia dall'esterno verso l'interno: all'esterno possiamo osservare dei grani α equiassici che evolvono poi verso l'interno in grani α aciculari fini. Si notano inoltre nella parte interna piccole porosità di fusione.

La corona ottenuta da fusione presenta sia sulla superficie interna che esterna, Figura 63 numerose e notevoli porosità di dimensioni variabili. Queste sono particolarmente evidenti nella macrografia di Figura 64, nella stessa Figura si osserva una struttura α -aciculare a grani grossolani.

Al contrario dei manufatti da fusione, quelli generati tramite tecnica additiva a letto di polveri (*Laser Powder Bed Fusion* - LPBF), mostrano una finitura superficiale migliore delle loro controparti generate con processo di fabbricazione classico, nonostante si possano osservare una rugosità elevata ed alcune porosità, Figura 69 ma in numero minore e con dimensioni decisamente più contenute rispetto alle controparti realizzate mediante processo di fusione classico, come si evince dal confronto tra la Figura 63 e la Figura 69. Sulla superficie del cilindro cavo esistono zone decoese poco profonde, Figura 67. Nella stessa Figura sono evidenti piccole e sporadiche porosità. La superficie del cilindro è comunque migliore di quella della corona realizzata con processo di fusione, sono presenti meno asperità sia nella parte interna che nella parte esterna della superficie. La superficie interna



a)



b)

Figura 60: Campioni ottenuti da fusione sezionati: a) bocchetto, b) corona. Sulla corona si osserva la presenza di porosità di diverse dimensioni.

del cilindro, in particolare, è più omogenea e mostra porosità piccole, di dimensioni

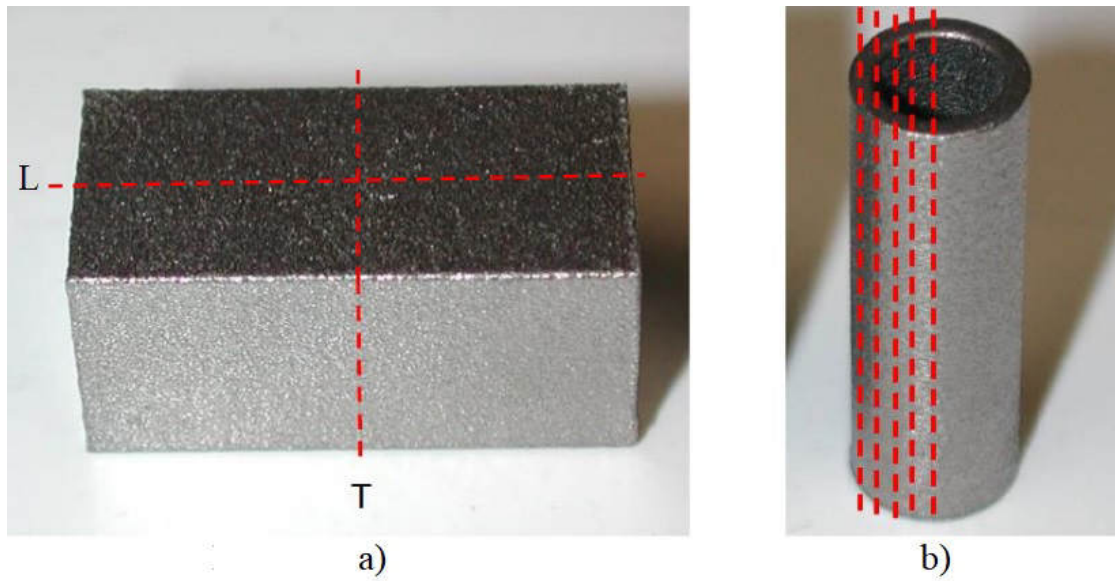
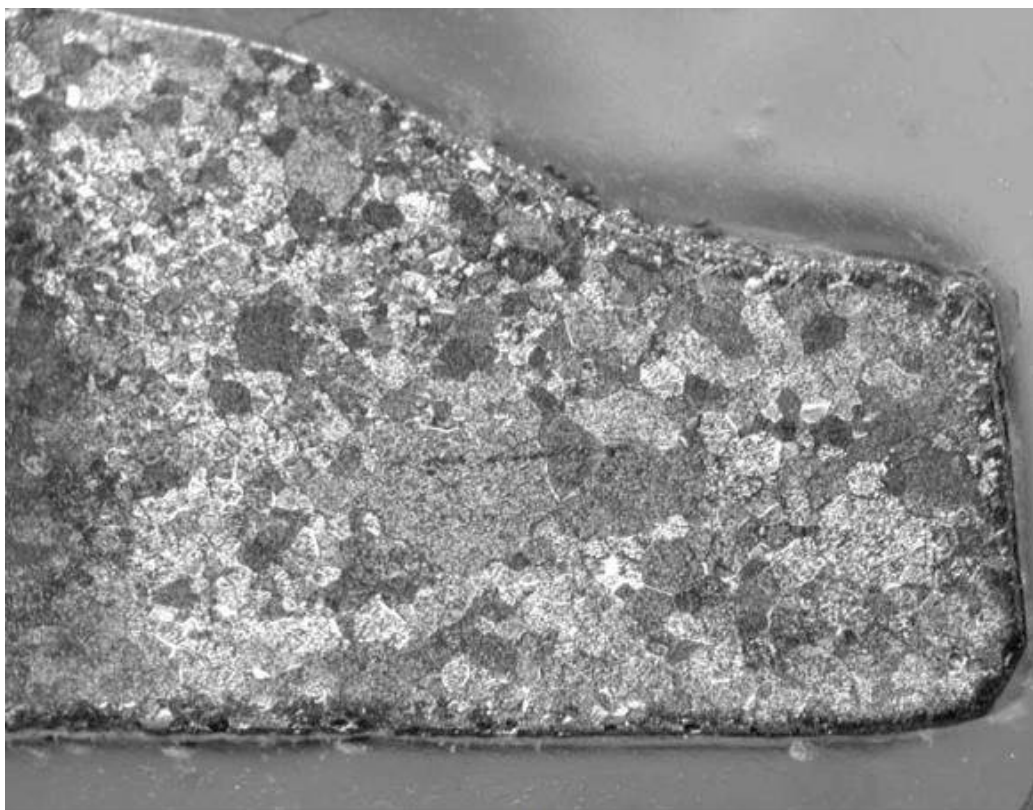
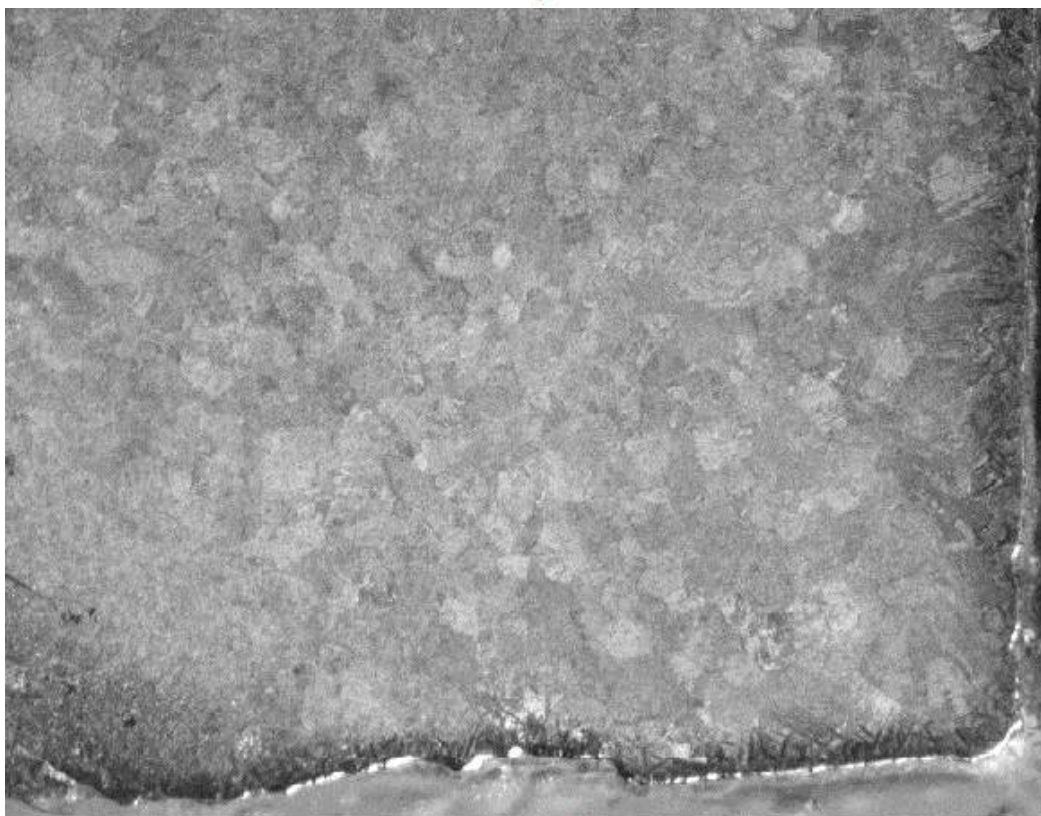


Figura 61: Campioni generati DMLS con l'indicazione in rosso del modo in cui sono stati sezionati: a) cuboide sezionato lungo i piani longitudinale e trasversale, b) cilindro cavo sezionato longitudinalmente.

molto minori rispetto a quelle della corona realizzata con processo di fusione. I manufatti prodotti con tecnologia DMLS a letto di polveri non presentano distorsioni rilevanti o evidenti fenomeni di *balling*.



a)



b)

Figura 62: Macrostruttura del blocco ottenuto da fusione classica. a) Si osserva una struttura a grani grossolani e in b) un suo ingrandimento.

0.23.2 Analisi microstrutturale dei campioni in titanio grado 2

L'analisi microstrutturale del blocchetto fuso ha evidenziato una struttura non uniforme. Osservando la superficie in Figura 71 si nota una microstruttura α , α aciculare e a graticcio; nella Figura 72.b) è evidente anche la presenza di porosità. L'osservazione microscopica della corona ha evidenziato una microstruttura α aciculare a graticcio, ovvero una Widmanstätten, si nota anche la presenza di diverse porosità dovute alla fusione, Figura 73.

In relazione al cuboide realizzato tramite processo LPBF con la EOS M290, l'analisi della microstruttura superficiale ha evidenziato una struttura di tipo martensitico (α') come si può osservare sia sulla sezione longitudinale, Figura 74.a) che trasversale, Figura 74.b). Sono presenti alcune, benché rare, particelle parzialmente decoese. Sulla sezione longitudinale del cuboide è presente una porosità delle dimensioni di pochi micron, Figura 75. Considerato che le polveri di Ti Cp della EOS hanno una granulometria compresa tra 38 e 45 μm , viste le dimensioni del poro e la sua morfologia, sembrerebbe trattarsi di un granello di polveri mancante, piuttosto che di una zona con mancanza di fusione, sebbene nel caso sarebbe comunque piccola e limitata.

Dalle Figura 74 si evince che il cuboide in titanio grado due generato DMLS risulta isotropo, giacché la sua microstruttura martensitica (α') è la stessa sia lungo la direzione trasversale che longitudinale, al contrario della lega Ti-6Al-4V che risulta anisotropa, come rilevato da *Shunmugavela et al.* [145].

L'isotropia rilevata nel cuboide implica che i manufatti in titanio grado 2 creati con processo DMLS hanno una saldabilità migliore rispetto a quella dei prodotti da fusione e da lavorazione ottenuti con la stessa lega: con i prodotti realizzati in DMLS non nasceranno concentratori delle tensioni nella saldatura. La saldabilità di questo materiale prodotto via DMLS è migliore anche dei corrispettivi in Ti-6Al-4V.

In relazione al cilindro cavo generato tramite processo a letto di polvere, via DMLS tramite la macchina EOS M290, la sua microstruttura, osservabile in Figura 77 e Figura 76 è α' martensitica; nelle immagini si notano placchette martensitiche di dimensioni simili a quelle del cuboide generato mediante tecnica SFF. Come possiamo rilevare in Figura 78 sul cilindro cavo sono presenti diverse particelle parzialmente decoese su tutta la superficie. Sulla sezione del cilindro cavo, in Figura 79, in particolare, sono evidenti piccole e sporadiche porosità ma non fessure. Tali porosità presentano comunque dimensioni trascurabili, se paragonate con quelle della corona realizzata mediante processo classico di fusione. Di conseguenza si evidenziano una scabrosità superiore a quelle del cuboide pieno, realizzato sempre mediante tecnica additiva a letto di polvere; ma decisamente inferiore a quella presente sul blocco ottenuto tramite tecnica classica di fusione. Quindi per il cilindro cavo, che rappresenta il campione preso come riferimento per la generazione di una corona dentale, è consigliabile effettuare un processo di finitura superficiale, come ad esempio una sabbiatura.



a)



b)

Figura 63: Macrostruttura della corona ottenuto da fusione classica. Si osserva la presenza di diverse e numerose porosità affioranti sia sulla superficie esterna a) che interna b).

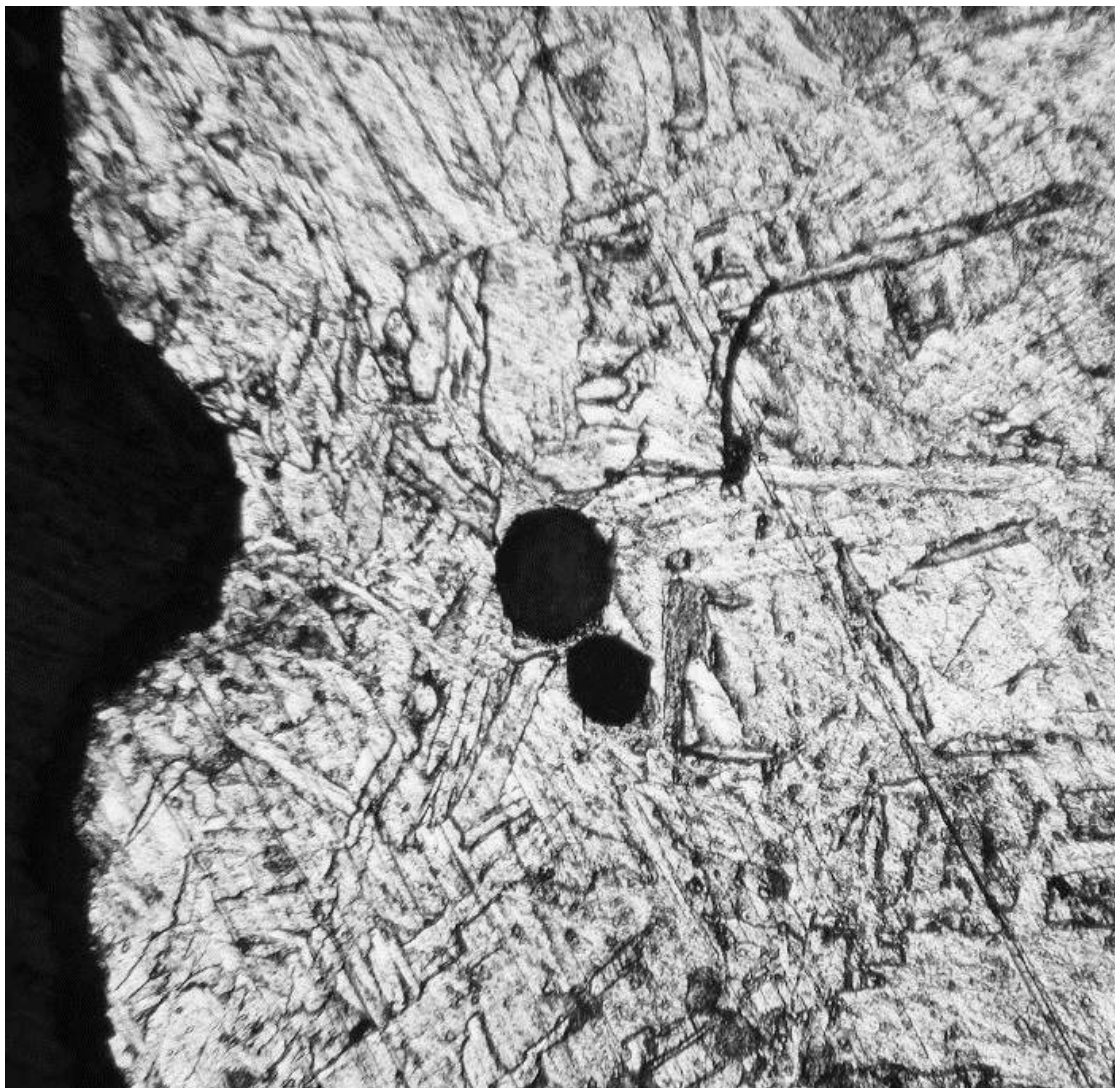


Figura 64: Macrografia della corona. È evidente una struttura α -aciculare a grani grossolani e la presenza di diffuse porosità di dimensioni variabili.



Figura 65: Superficie esterna del cilindro. Buona finitura superficiale senza evidenti porosità

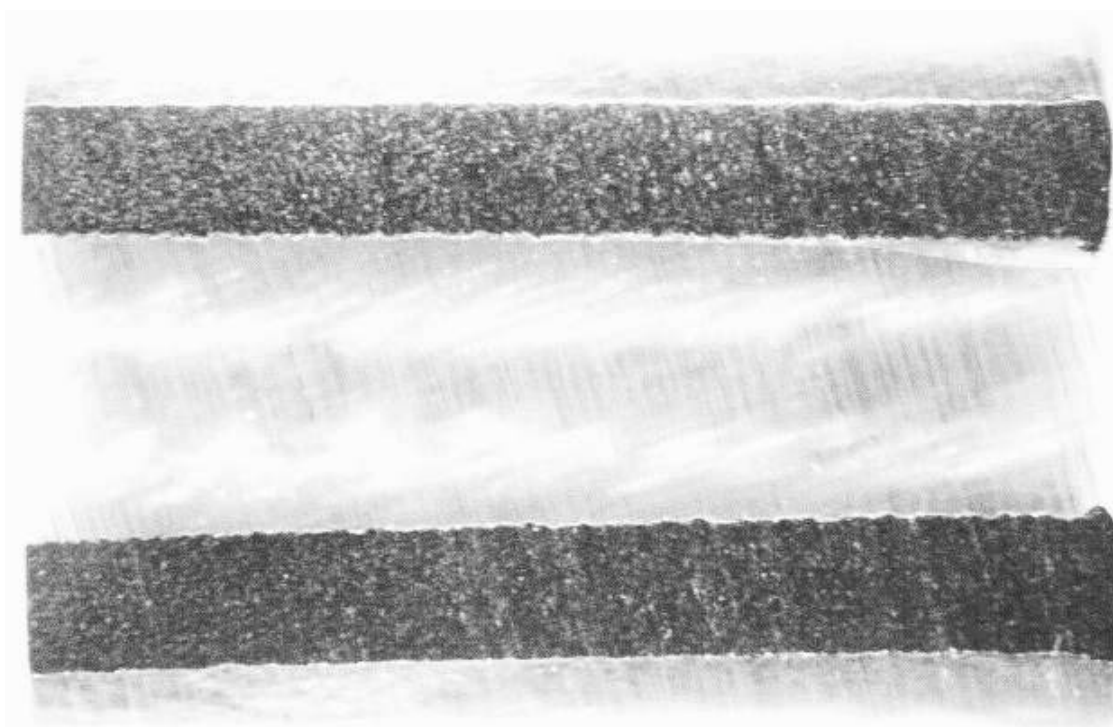


Figura 66: Superficie interna del cilindro. A piccoli ingrandimenti non si notano porosità.

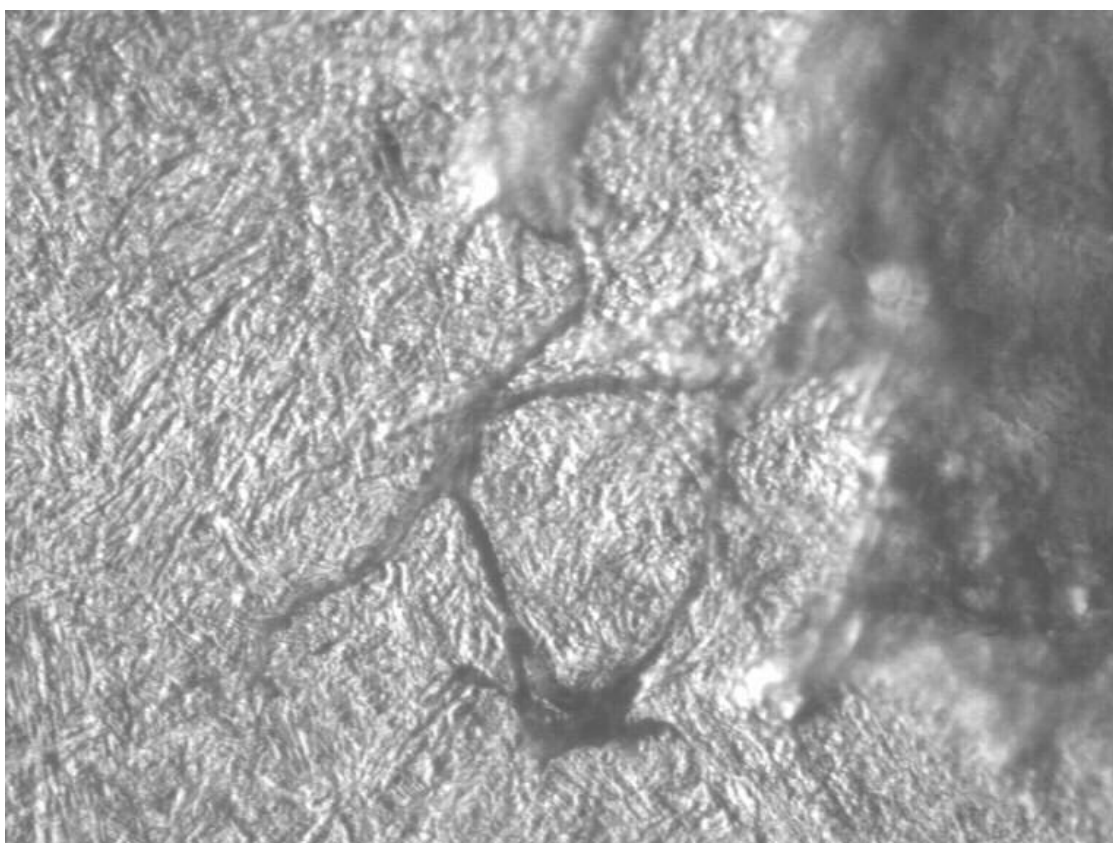


Figura 67: Sulla superficie del cilindro esistono zone decoese poco profonde e piccole, sporadiche porosità.



Figura 68: Superficie superiore del cuboide.

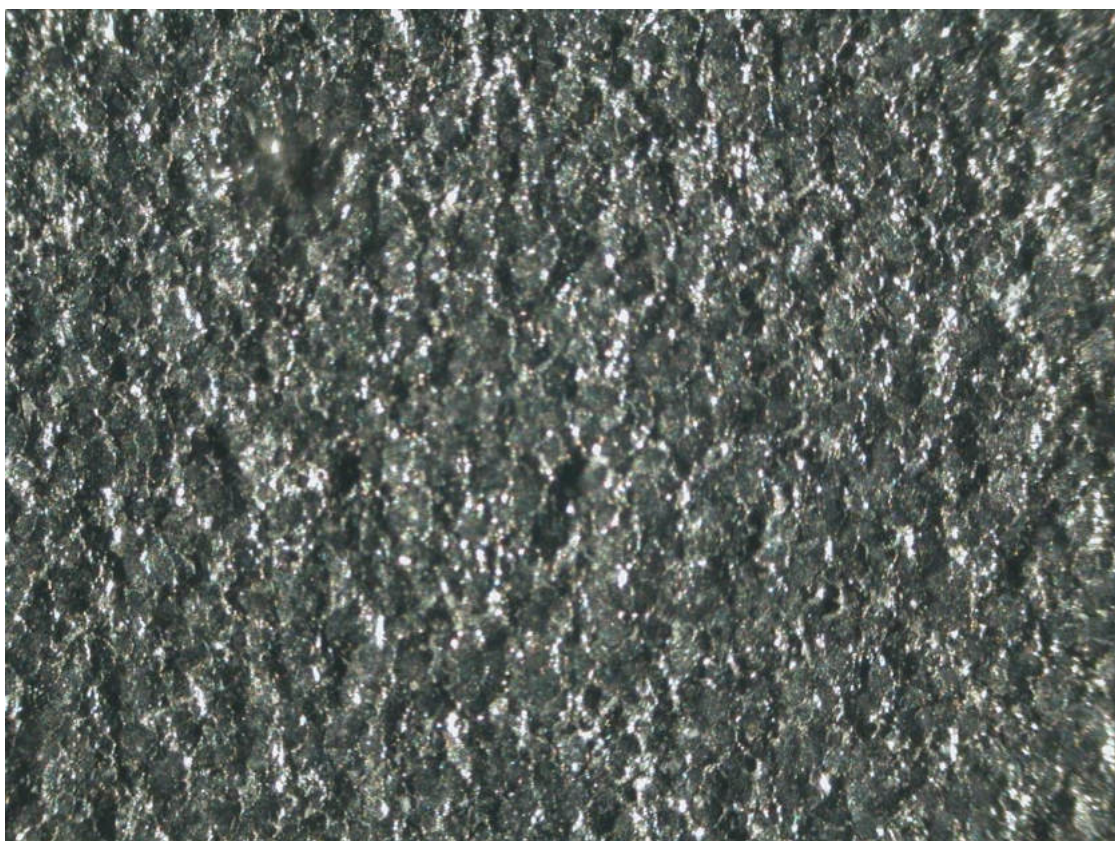


Figura 69: Superficie laterale del cuboide. Sono distinguibili alcune porosità benché di dimensioni ridotte.

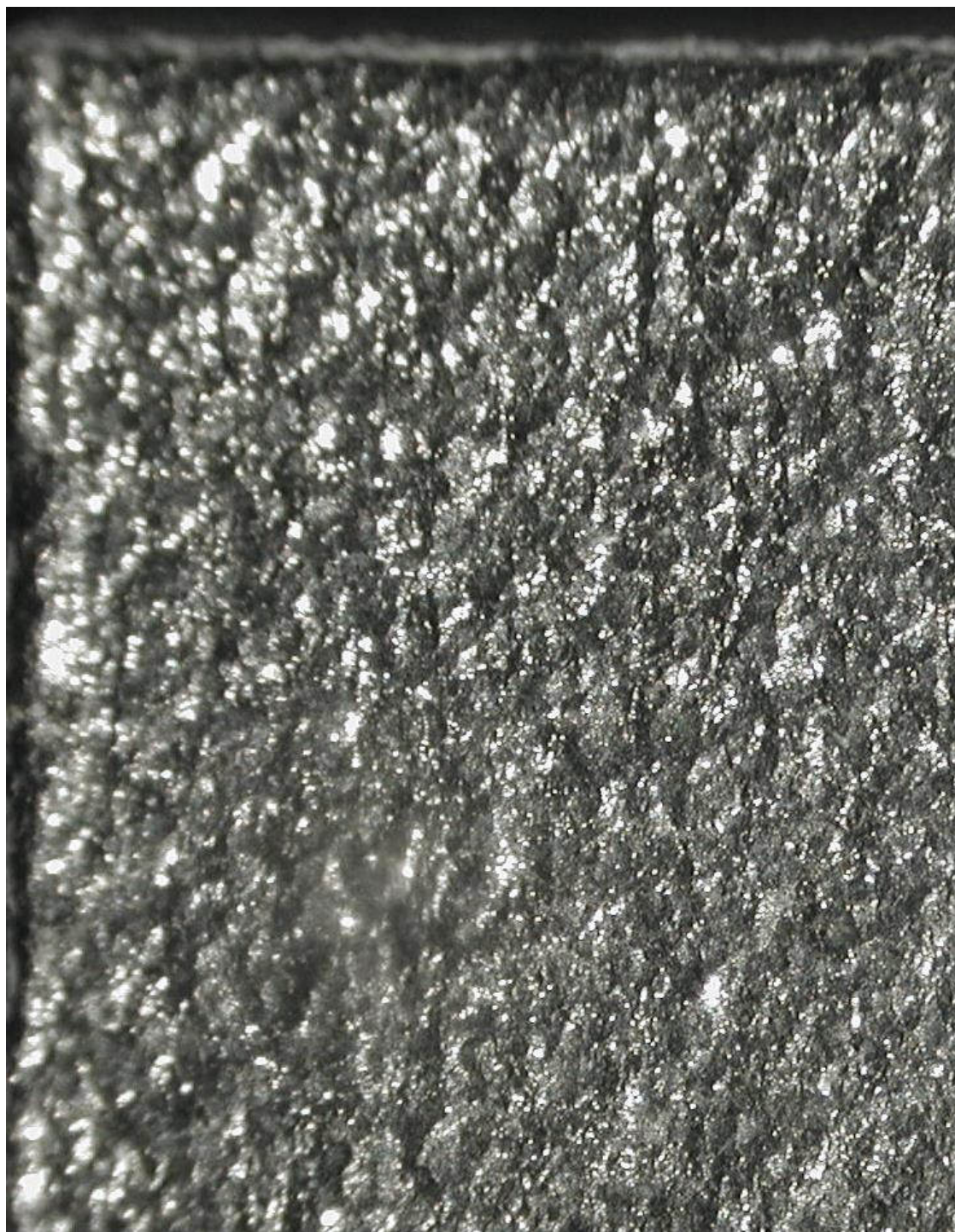
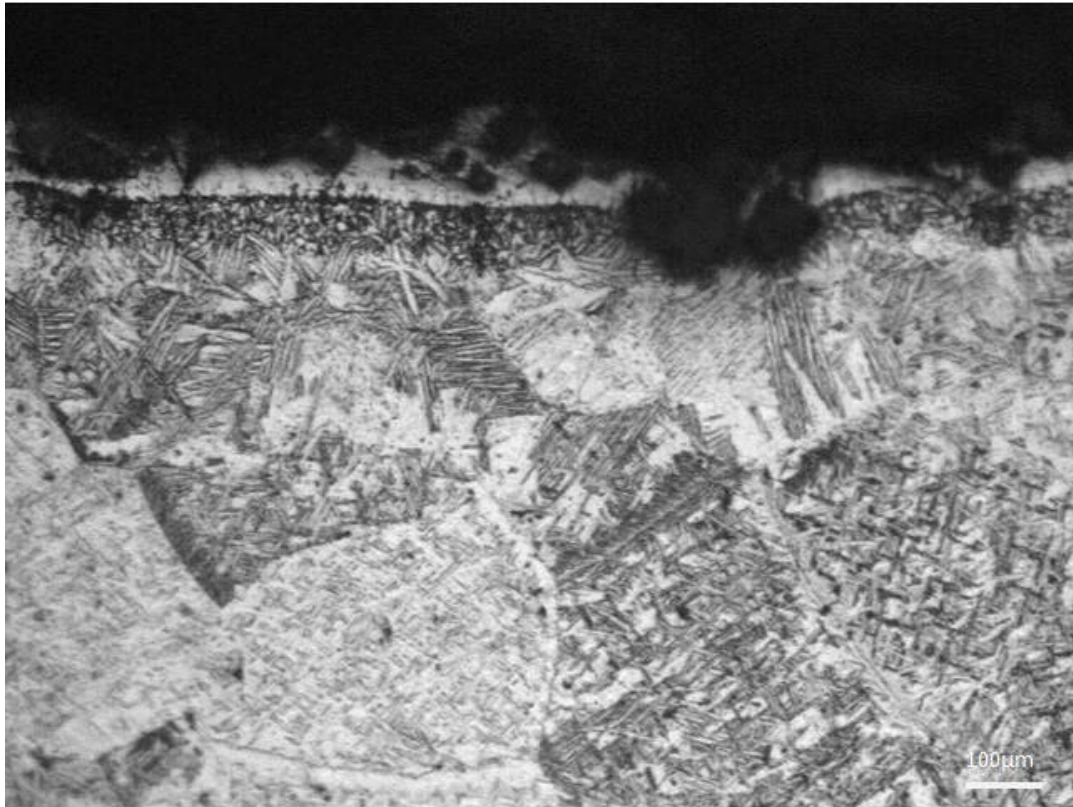
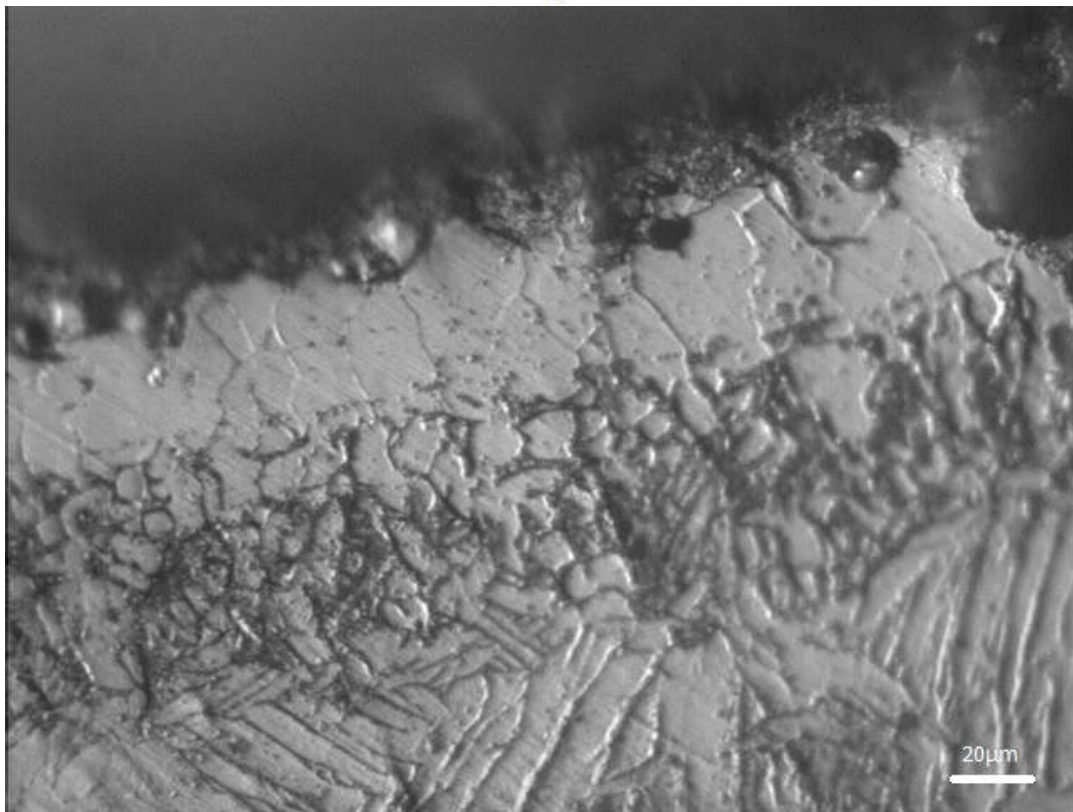


Figura 70: Superficie inferiore del cuboide.

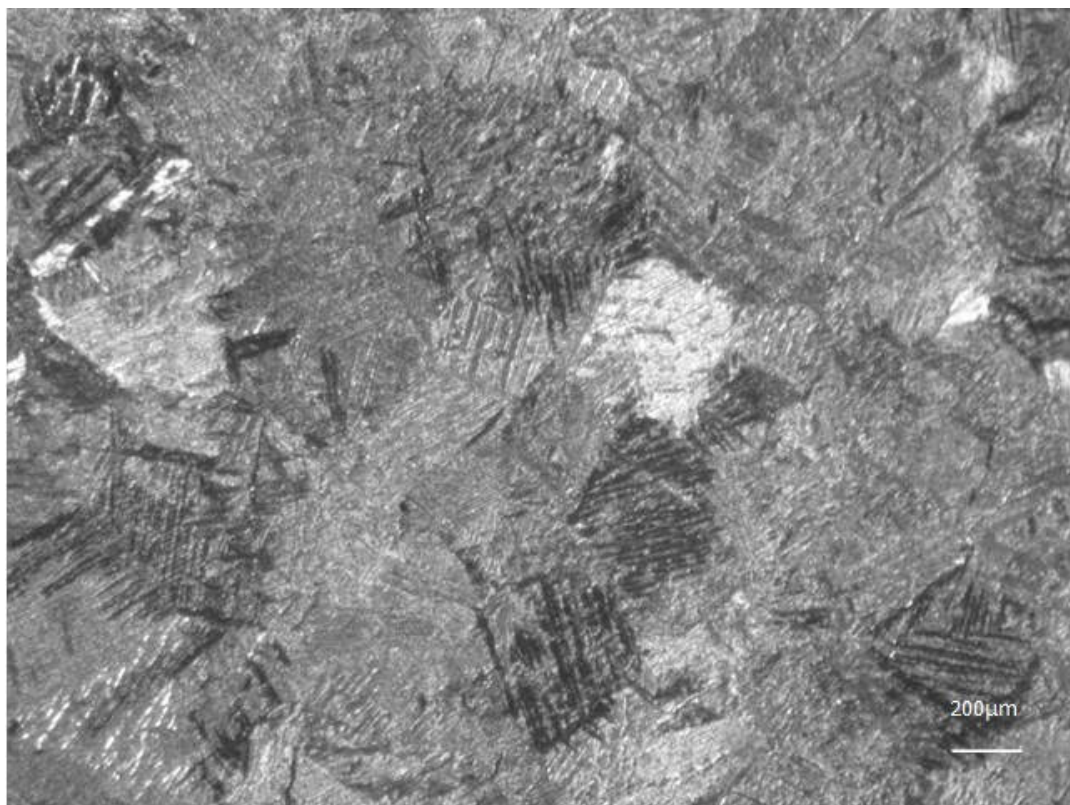


a)

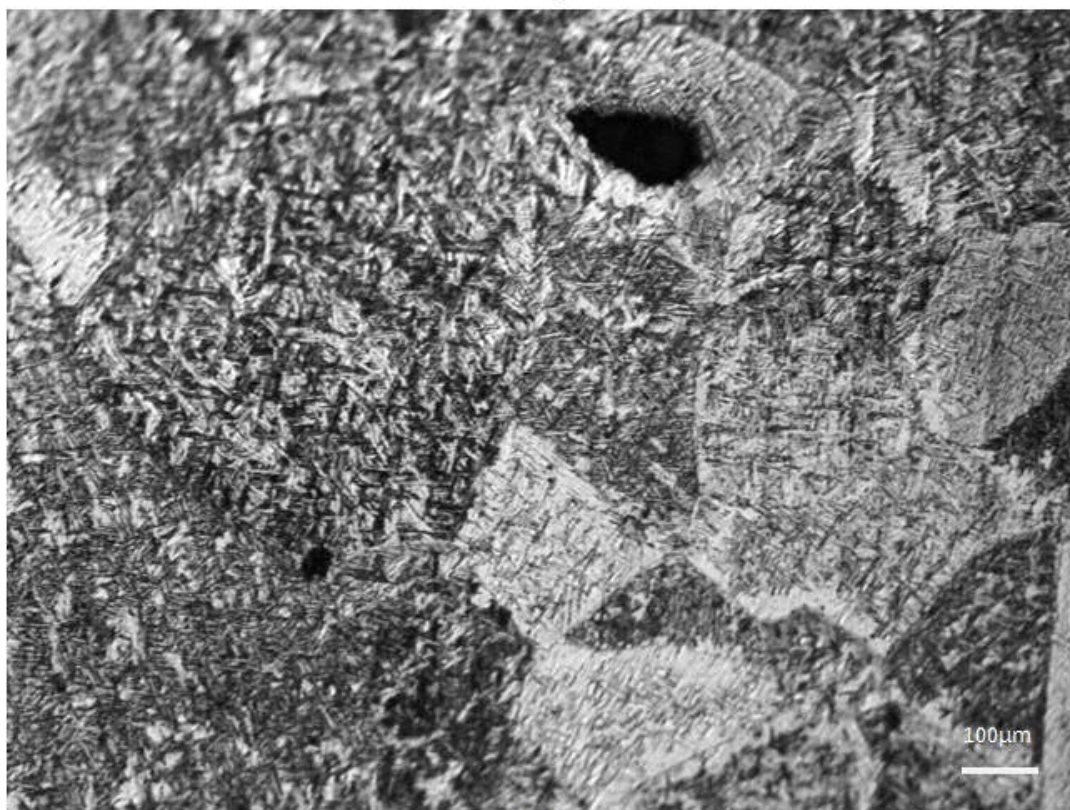


b)

Figura 71: Superficie del blocco ottenuto da fusione classica. a) Si osserva una microstruttura α , α aciculare e a graticcio. b) A maggiori ingrandimenti si osserva la microstruttura α e α aciculare.

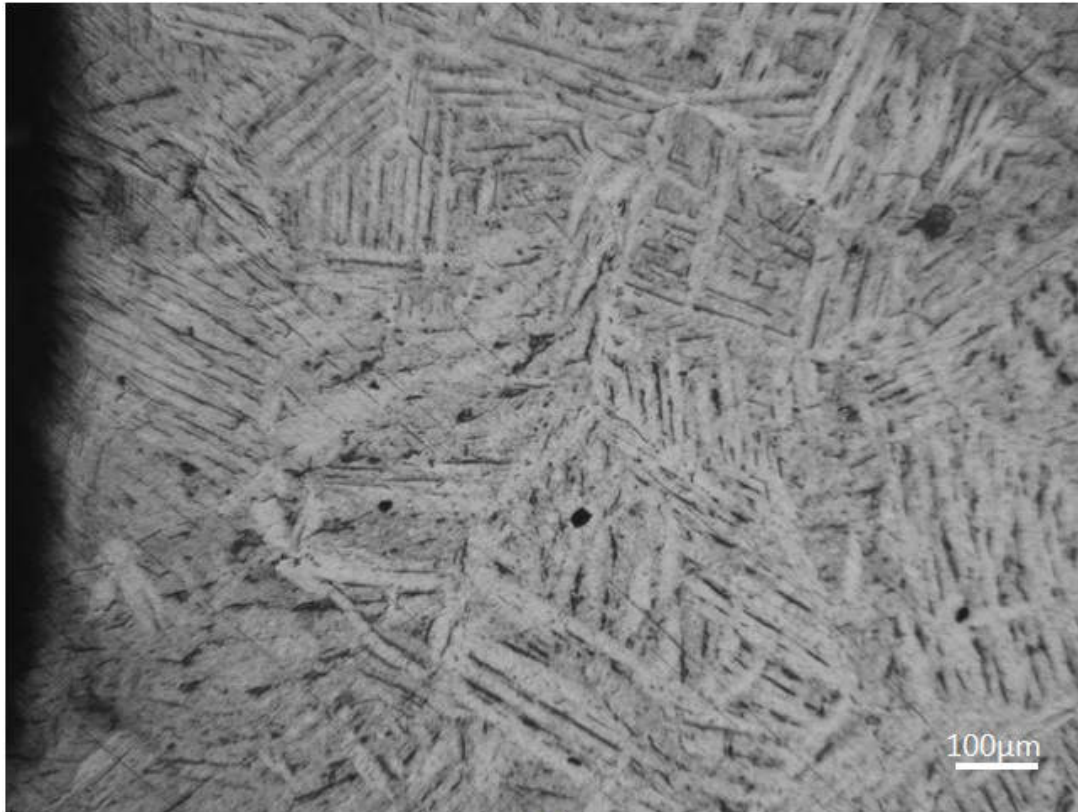


a)

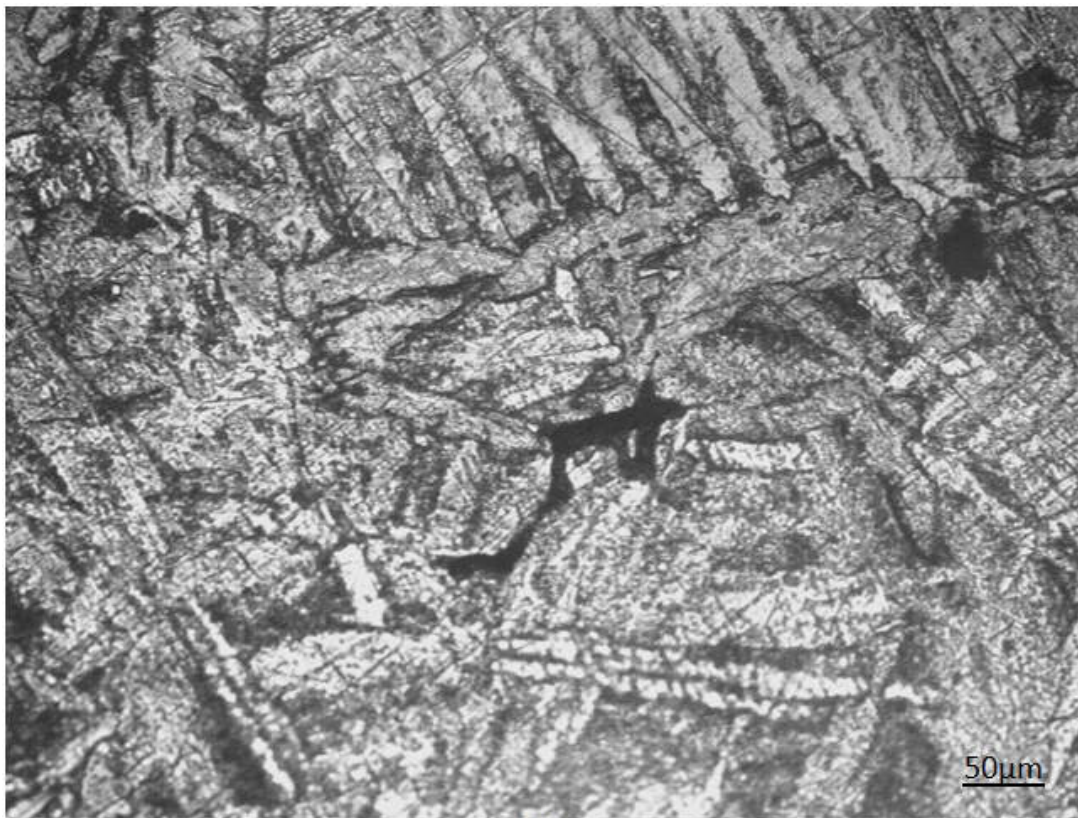


b)

Figura 72: Microstruttura del blocco ottenuto da fusione classica. a) Microstruttura α e α' aciculare. b) Porosità presente nel fuso.

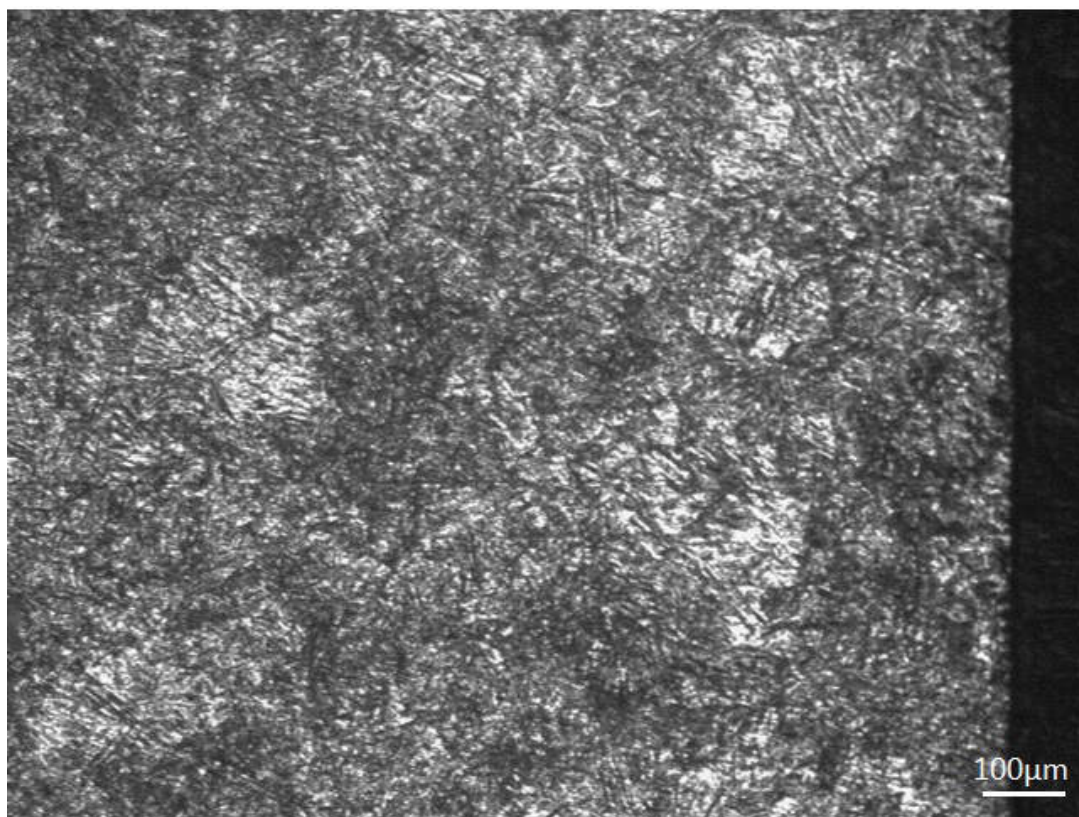


a)

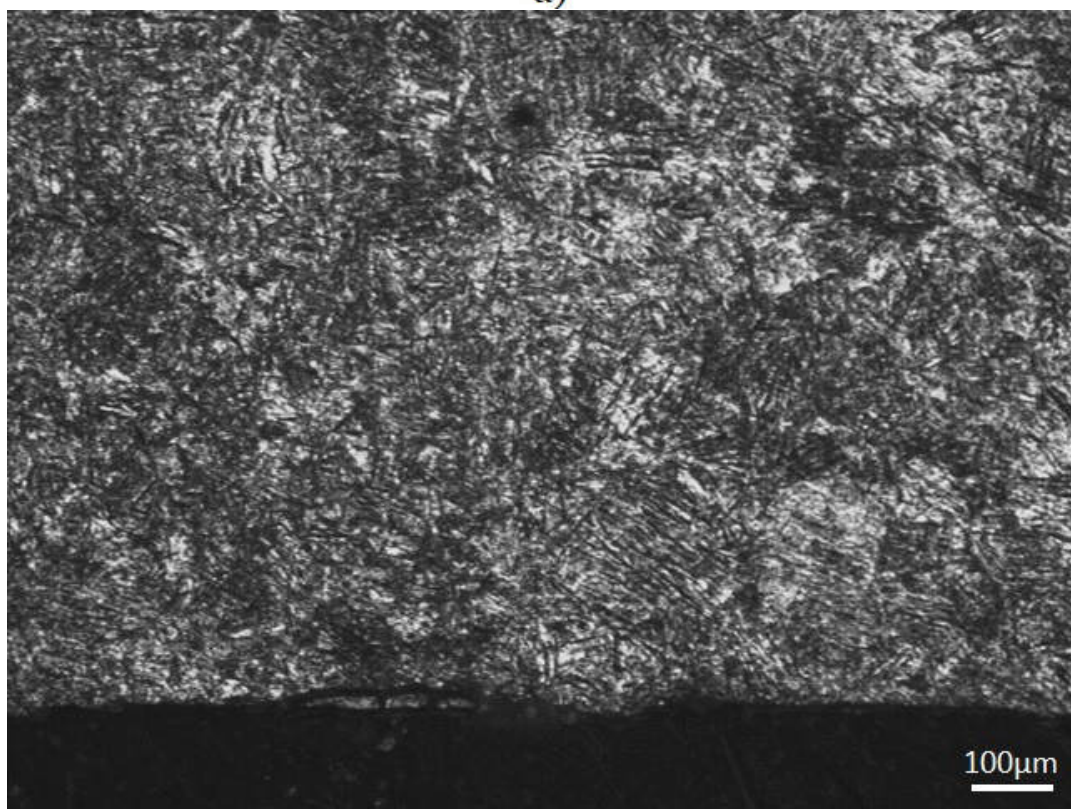


b)

Figura 73: Microstruttura della corona da fusione. a) Si osserva una microstruttura α aciculare a graticcio (Widmanstätten) e b) la presenza di porosità dovute al processo di fusione.



a)



b)

Figura 74: Microstruttura della sezione a) longitudinale e b) trasversale della superficie del cuboide realizzato tramite processo DMLS. Si osserva una microstruttura di tipo martensitico α' e la presenza di rare particelle parzialmente decoese.

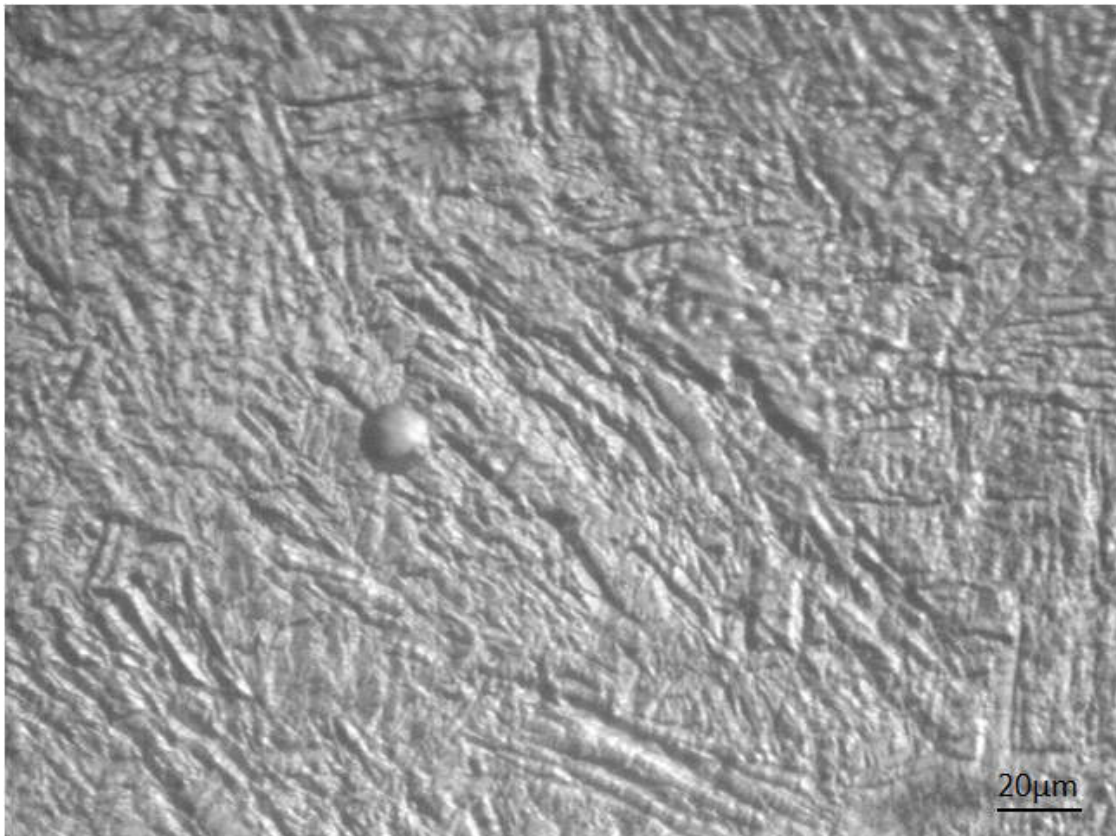


Figura 75: Sezione longitudinale del cuboide generato tramite LPBF. È presente una porosità delle dimensioni di pochi micron.

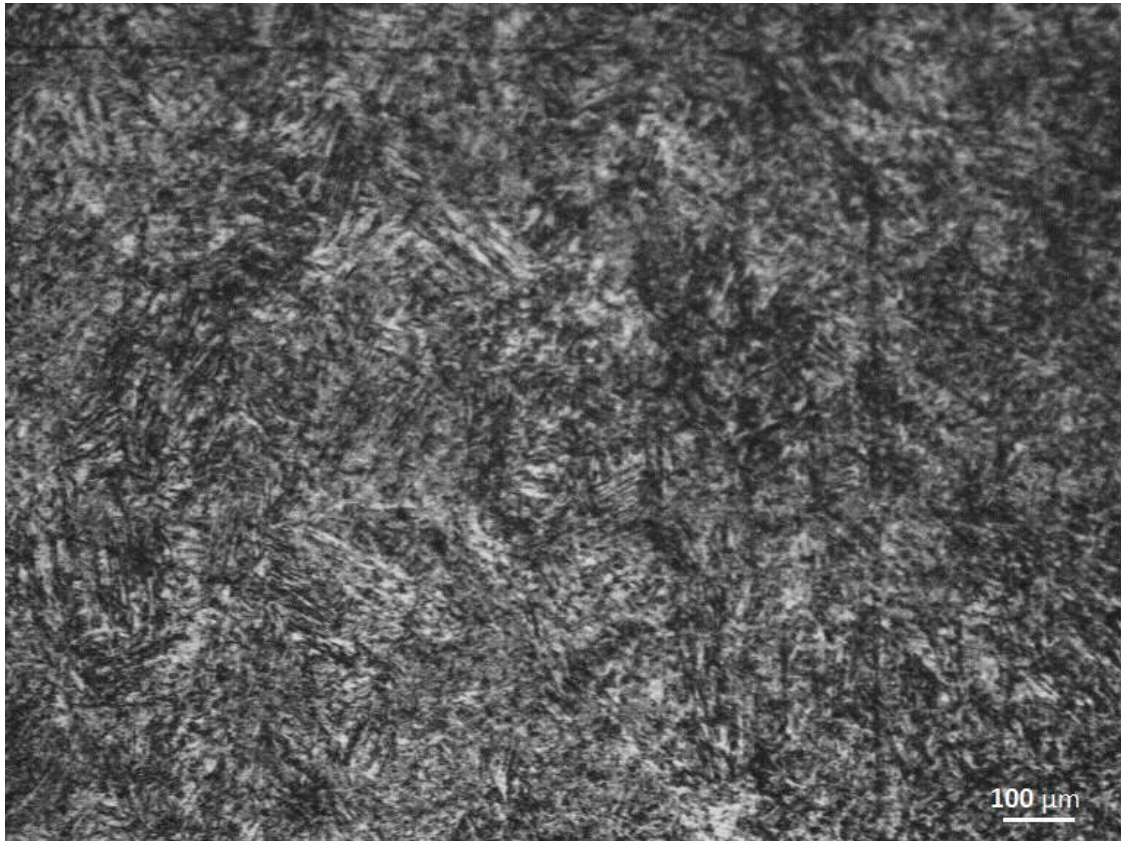
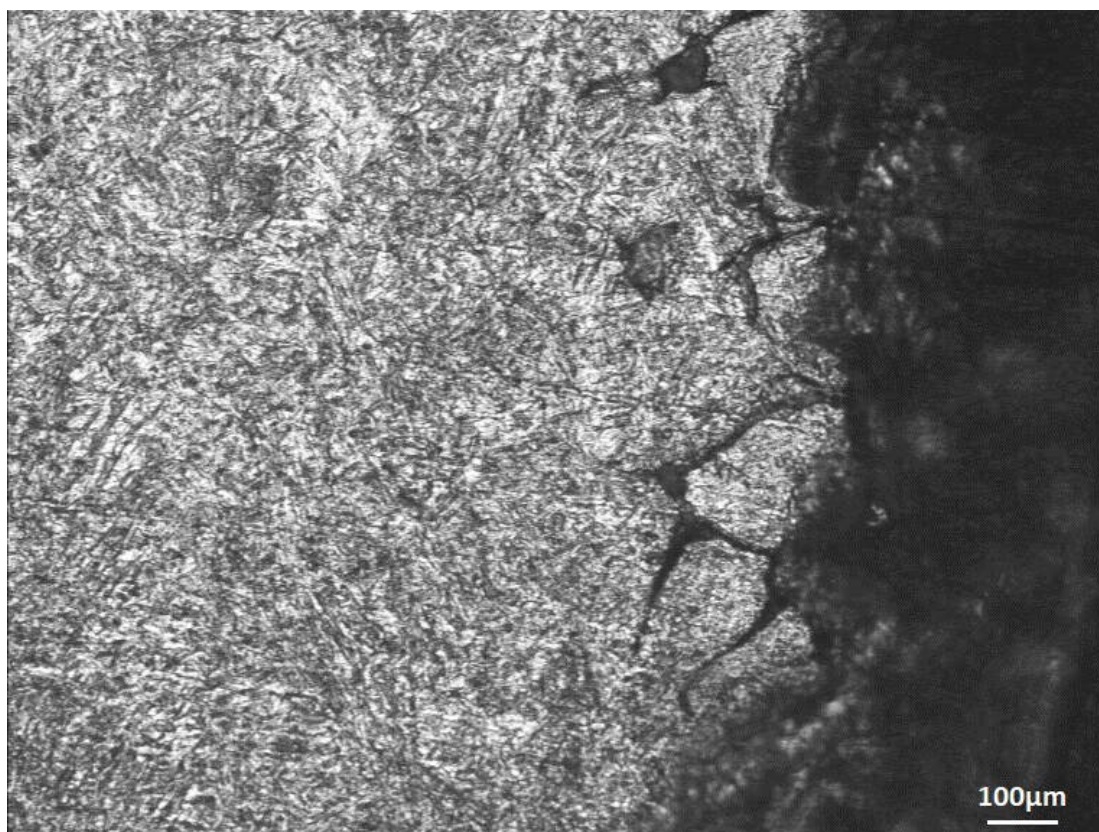
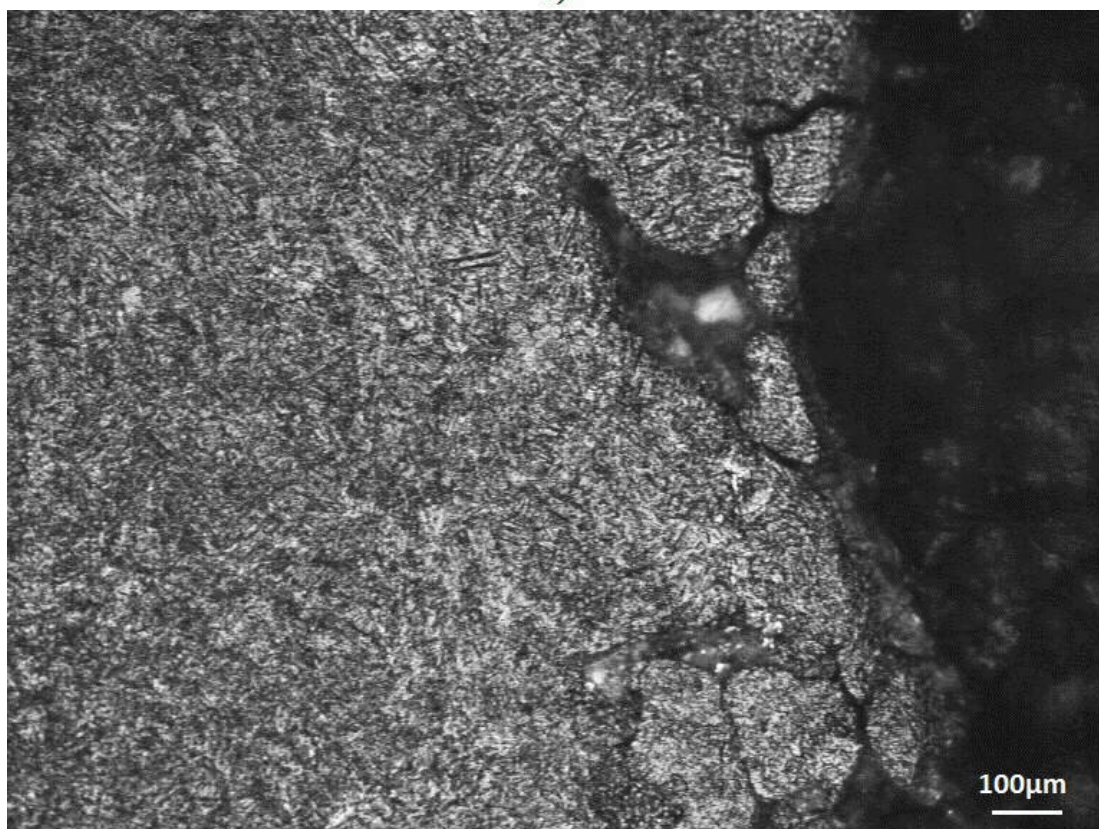


Figura 76: Microstruttura del cilindro cavo realizzato in additive manufacturing mediante la EOS M290. Si possono osservare placchette martensitiche di dimensioni simili a quelle de cuboide generato AM.

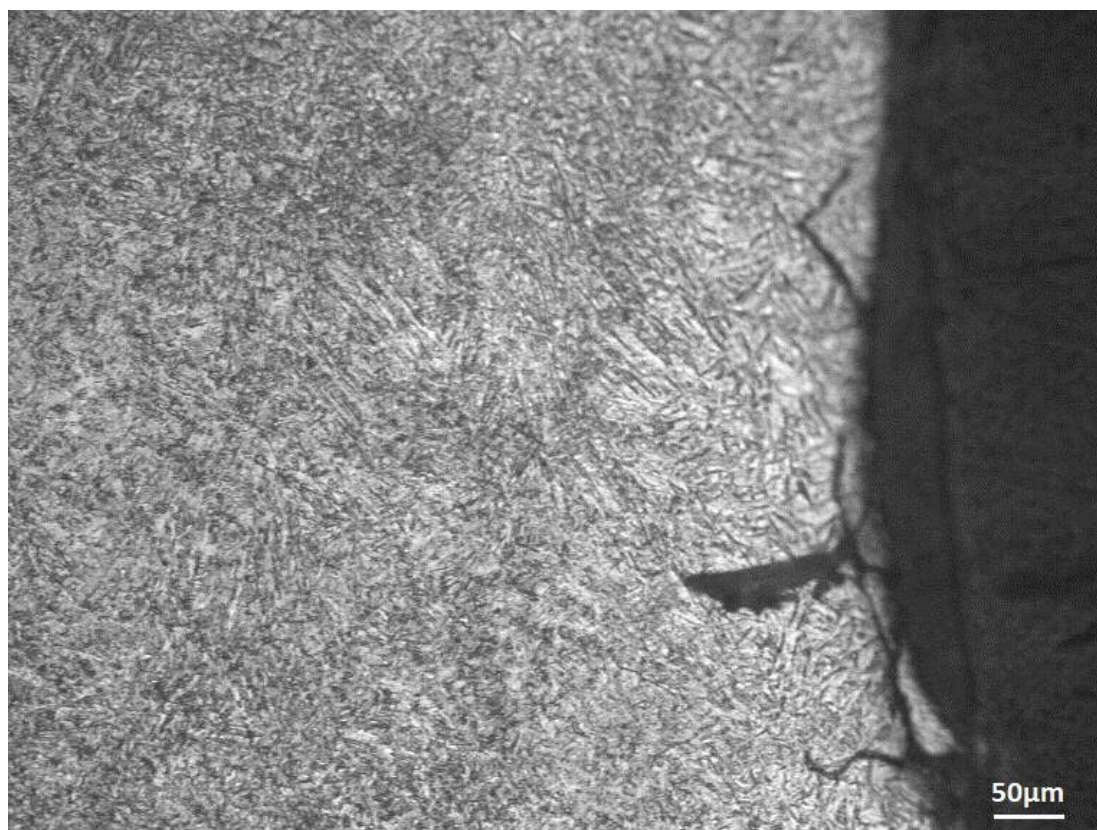


a)

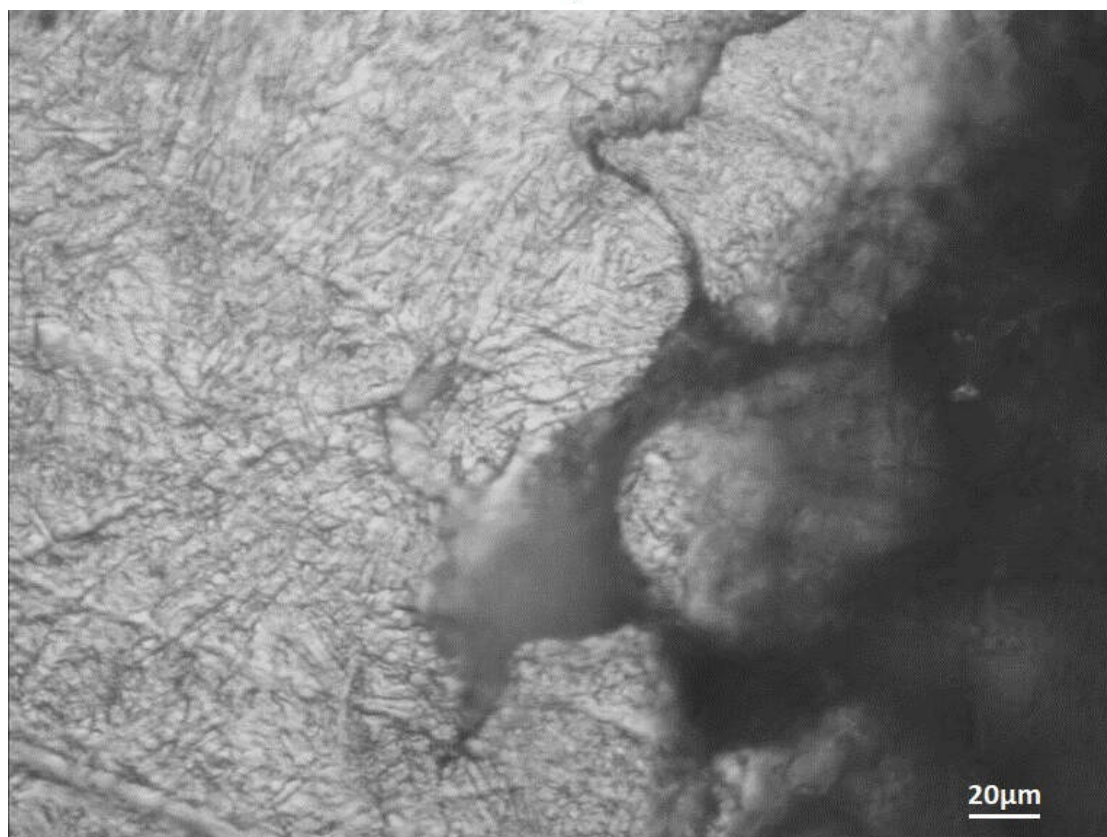


b)

Figura 77: Microstruttura del cilindro cavo generato tramite processo a letto di polvere via DMLS. La microstruttura è di tipo α' martensitica.

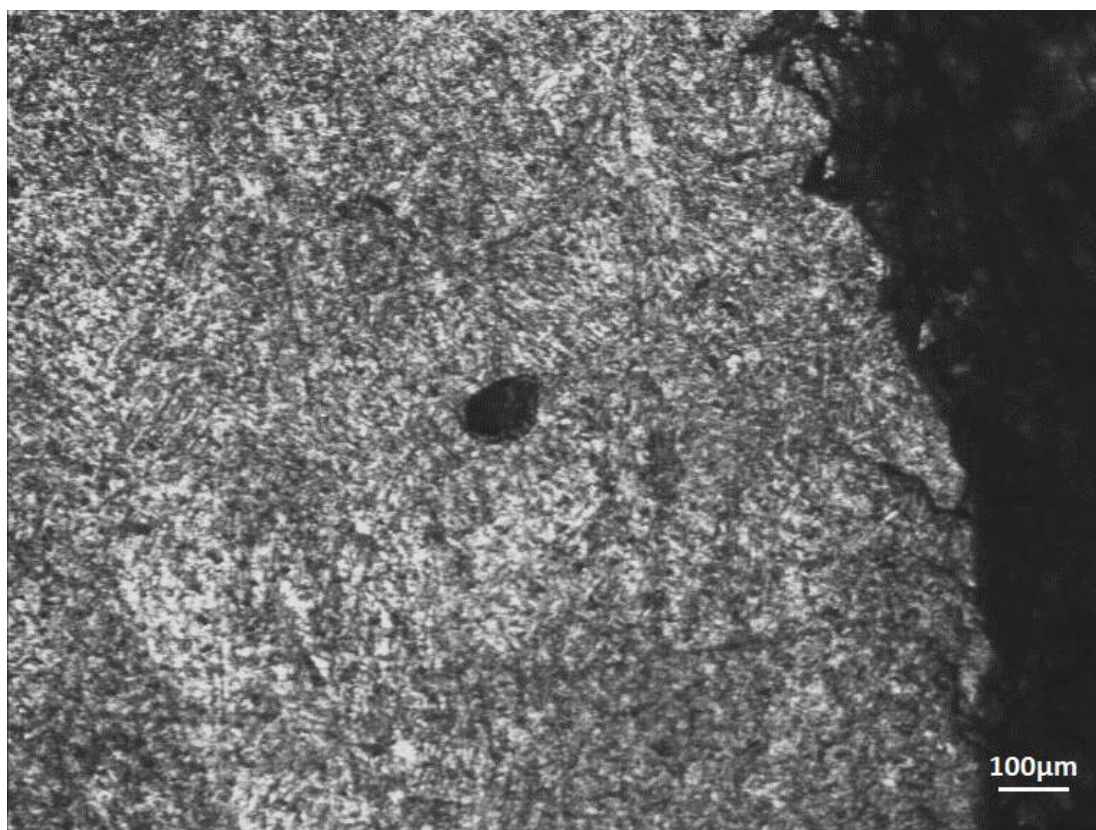


a)



b)

Figura 78: Cilindro cavo ottenuto da processo SFF. Sono visibili particelle parzialmente decoese su tutta la superficie.



a)



b)

Figura 79: Cilindro cavo generato DMLS, sono evidenti sporadiche e piccole porosità ma non sono presenti fessure.

0.23.3 Durezza dei campioni titanio grado 2

In relazione alla microdurezza Vickers, significativa delle proprietà meccaniche (il suo valore è legato al limite di snervamento dalla relazione: $\sigma_y \approx 3\mu HV$), le prove sono state effettuate con un carico di 50gf (490.5×10^{-3} N), mantenuto per 10 secondi. La $\mu HV_{50,10}$ del blocchetto ottenuto con il processo di fusione classico, Figura 81 varia da 175 a 225. La microdurezza Vickers per la corona generata tramite processo classico di fusione, presenta valori compresi tra 200 e 216. Nel caso dei manufatti generati tramite processo SFF, le microdurezze Vickers sulla sezione longitudinale del cuboide $\mu HV_{50,10}$ hanno valori compresi tra 271 e 293, Figura 83.a) mentre quelle della sezione trasversale del cuboide, hanno fornito valori compresi tra 274 e 303, Figura 83.b). Per il cilindro cavo generato DMLS, sono stati misurati valori compresi tra 280 e 303, Figura 84. Quindi le caratteristiche meccaniche dei manufatti generati DMLS sono migliori di quelle delle controparti ottenute con processo di fusione. I prodotti da additive avendo una durezza maggiore presentano una migliore resistenza all'usura, essenziale per corone e scheletrati dentali che durante il processo di masticazione (o se il paziente soffre di bruxismo) sono soggetti a carichi tempovarianti che ne potrebbero compromettere la funzionalità.

É stata effettuata un'indagine sulla microdurezza Vickers $\mu HV_{50,10}$ rilevata su 10 diversi campioni in titanio per impianti dentali generati con metodi classici; tali materie prime sono state fornite da altrettanti produttori. I risultati dell'indagine sono visibili in Figura 80. Le microdurezze sono state calcolate sia sulla superficie, dove sono presenti gli ossidi, sia all'interno dei campioni perché significative delle caratteristiche meccaniche tensionali. In media le microdurezze rilevate per i 10 provini da manifattura classica, sono confrontabili con quelle ottenute per il cuboide generato DMLS.

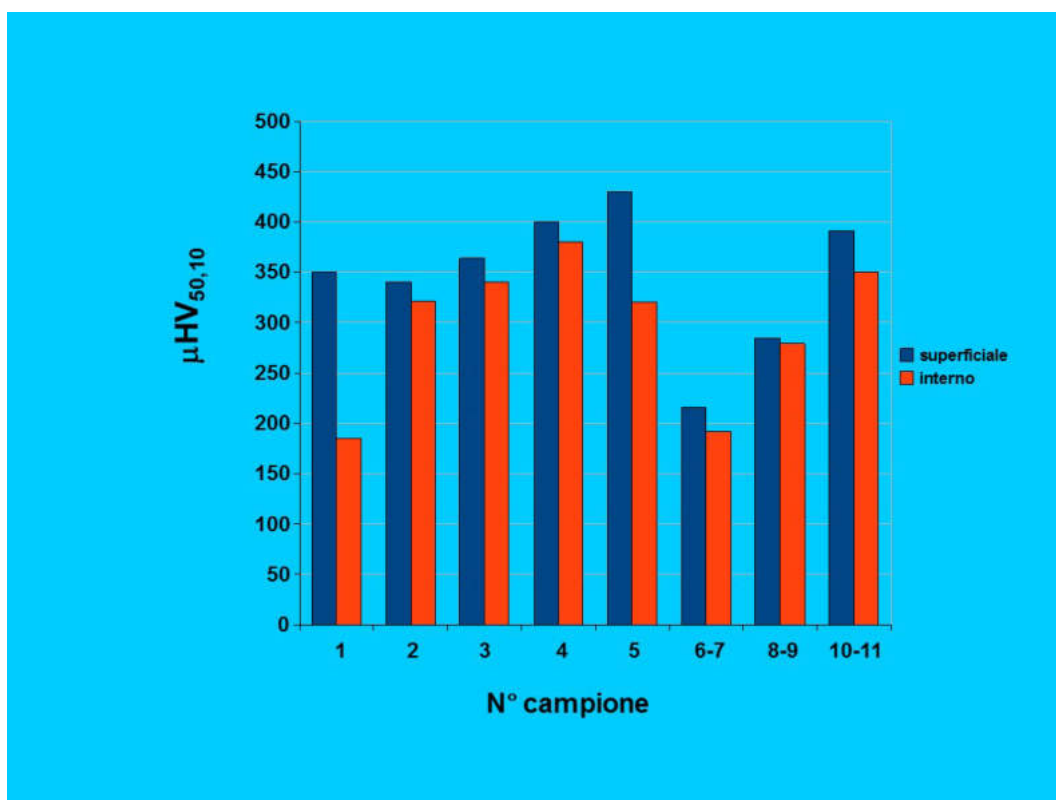
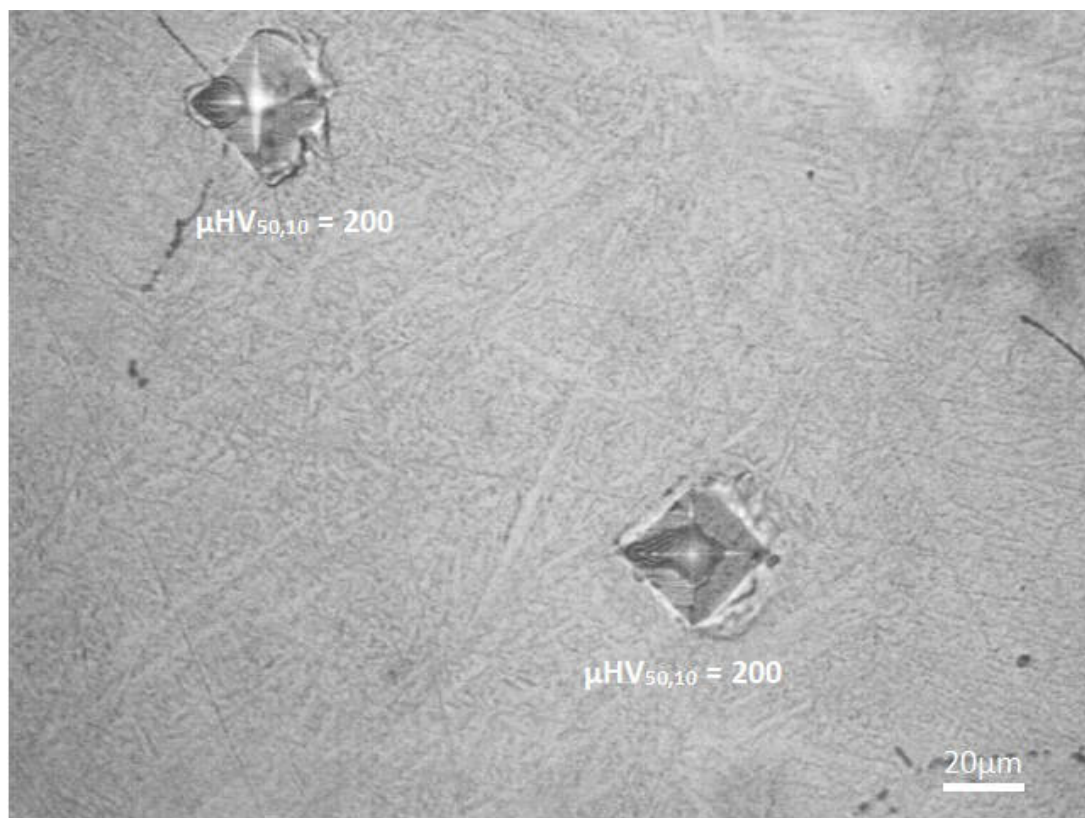


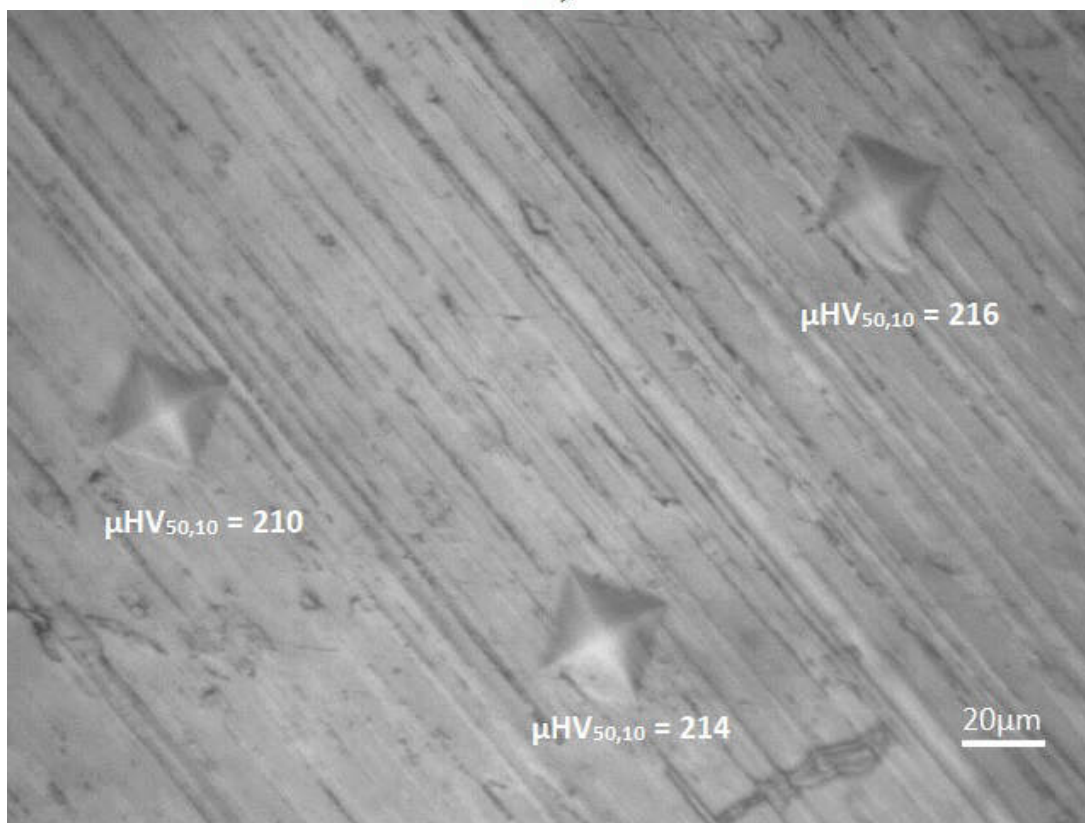
Figura 80: Indagine svolta sulle microdurezze superficiali ed interne di dieci campioni in titanio per impianti dentali generati da processi classici.



Figura 81: Microdurezza Vickers misurata sul blocchetto di materiale generato tramite processo classico di fusione ($\mu HV_{50,10}$) pari a 225.

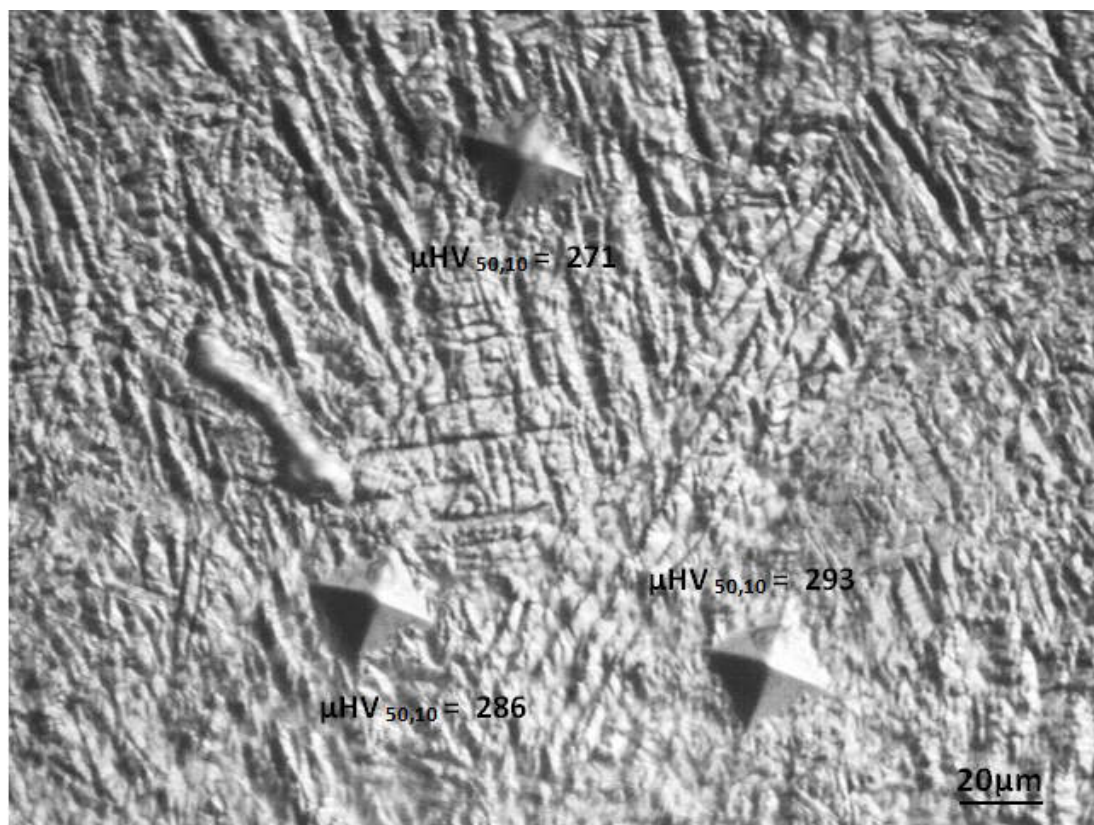


a)

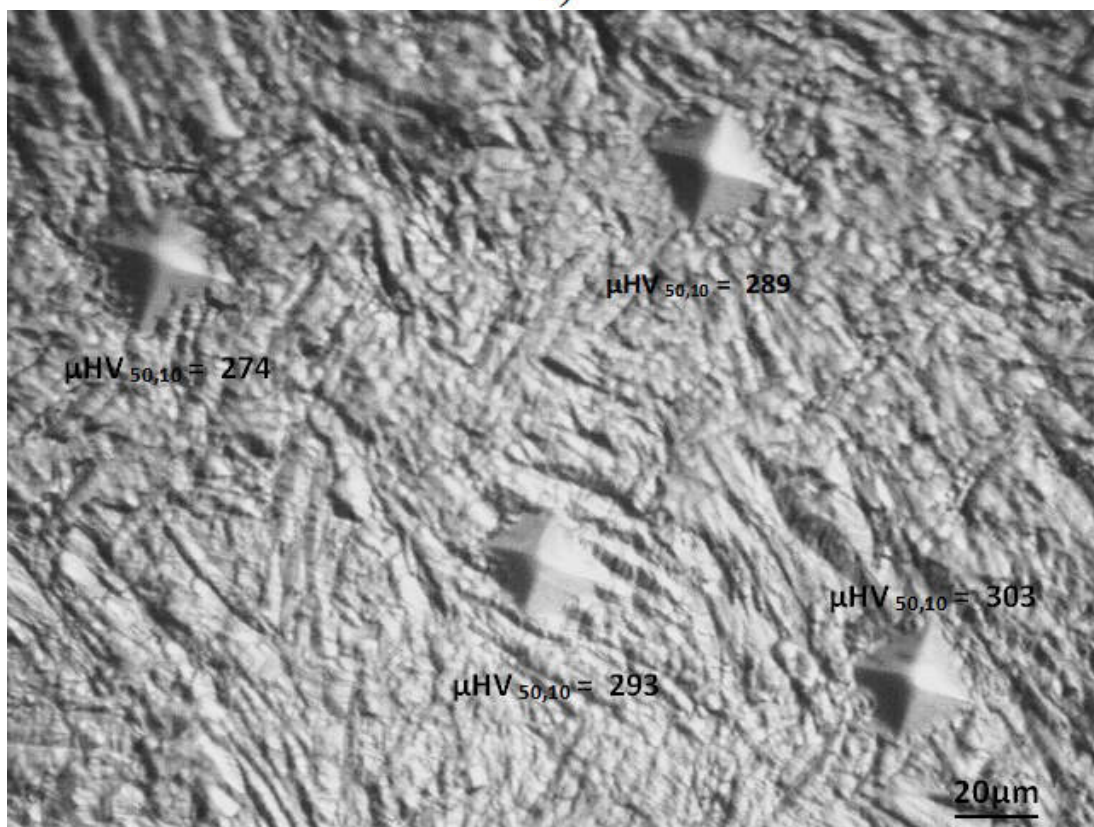


b)

Figura 82: Microdurezza Vickers della corona realizzata con processo classico di fusione. a) $\mu HV_{50,10} = 200$; b) $\mu HV_{50,10}$ compresa tra 210 e 216.



a)



b)

Figura 83: Microdurezza Vickers del cuboide generato tramite processo DMLS. a) Sulla sezione longitudinale del cuboide la $\mu HV_{50,10}$ ha valori compresi tra 271 e 293. b) Sulla sezione trasversale del cuboide la $\mu HV_{50,10}$ ha valori compresi tra 274 e 303.

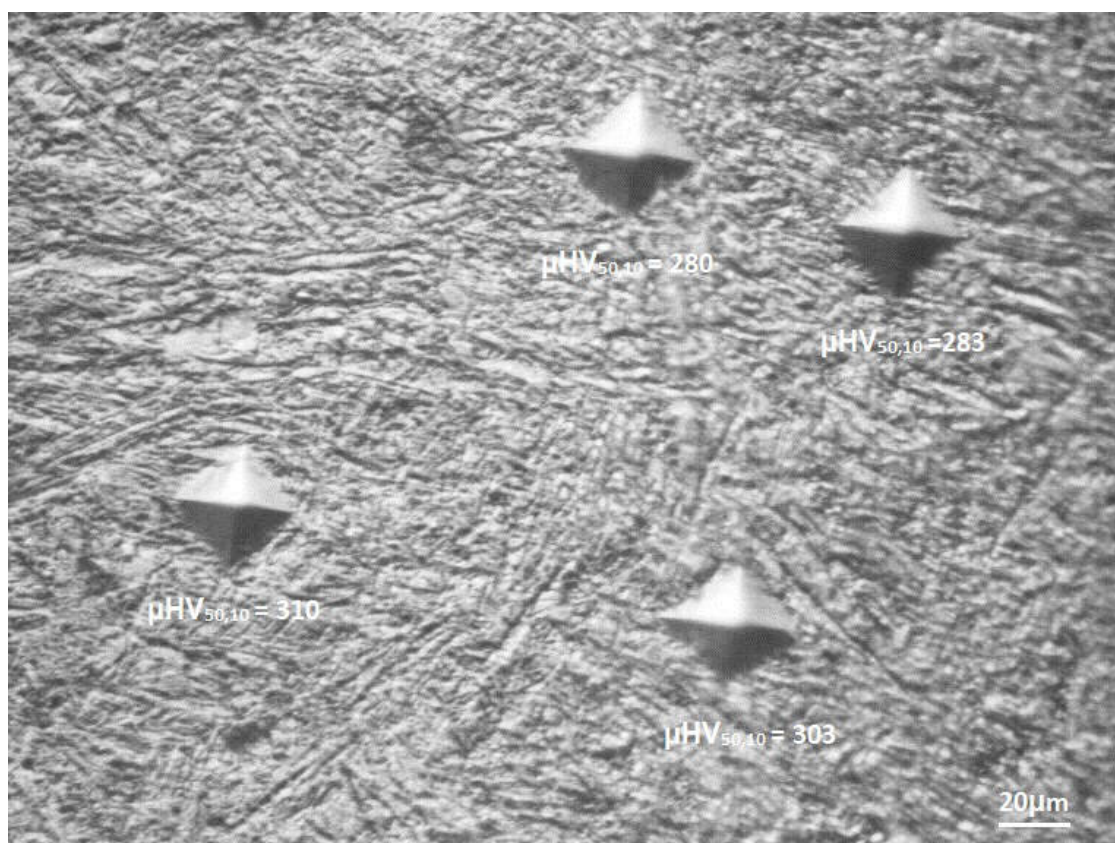


Figura 84: Microdurezza Vickers del cilindro cavo generato tramite processo DMLS. La $\mu HV_{50,10}$ ha valori compresi tra 280 e 303.

Conclusioni

Dal 1988, anno in cui venne realizzato per la prima volta da Deckard e Beaman [35] un manufatto con tecniche definite allora *Rapid Prototyping* - RP, attualmente *Additive Manufacturing* - AM o *Solid Freeform Fabrication* - SFF [50, 73, 36, 57, 58], la scienza ha mostrato interesse sempre crescente verso queste tecniche, potenziando esponenzialmente lo studio e la ricerca in questo settore.

Le tecniche additive a letto di polvere sono considerate all'avanguardia nel settore delle *Metal Additive Manufacturing* per la realizzazione di prodotti da inserire in ambito industriale. Tra i diversi materiali adottabili in questo campo spicca l'inconel-625, grazie anche alle sue caratteristiche quali la notevole resistenza a stress meccanici e termici, la rimarcata resistenza alla corrosione, all'ossidazione e all'usura. Questo materiale è inserito nella rosa di quelli che meglio si prestano alla lavorazione con tecniche SFF, piuttosto che con tecniche convenzionali [4].

Sono state svolte diverse e numerose indagini su questa lega di nichel, presso e in collaborazione con l'I.I.S. Dai risultati di un'analisi tomografica è emerso che il materiale è molto denso, sono state infatti rilevare difettologie costruite ad arte in un blocco campione generato con la tecnica *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS, solo per dimensioni del difetto maggiori di 0.3 mm.

Dal una prova non distruttiva svolta sui campioni in Inconel-625, ovvero dall'ispezione agli ultrasuoni, è emerso che il materiale mostra un'attenuazione strutturale di circa 6 dB, quindi risulta trasparente agli ultrasuoni, questo lo rende acusticamente più vicino a un prodotto realizzato da laminazione piuttosto che da saldatura. Il materiale è anisotropo, sia lungo la direzione di crescita dei piani che in ortogonale alla stessa; quindi ha una scarsa saldabilità.

Dalle analisi micrografiche sui campioni in lega di nichel sono evidenti diverse e diffuse dendriti colonnari; in linea con i risultati ottenuti in numerose ricerche presenti in letteratura [123, 124, 128, 129]. Sono state effettuate prove di trazione per valutare il carico di rottura, la resistenza allo snervamento e allungamento percentuale a rottura. Dai risultati è emerso che il materiale rispetta tutti i valori minimi stabiliti dagli standard delle norme ASTM F3056-14E1 [121] e B443-00 [120], rispettivamente, per prodotti generati con tecniche additive a letto di polveri in Inconel-625 e per prodotti da laminazione a freddo realizzati con tecniche tradizionali con lo stesso materiale. Questo rende i manufatti in Inconel-625 generati con tecnica *Laser Powder Bed Fusion* - LPBF, idonei all'impiego nel campo industriale.

Mediante tecniche di *reverse engineering* - RE possono essere creati con un macchinario SFF manufatti estremamente personalizzati; ad esempio tramite l'impronta dentale di un paziente in formato tridimensionale digitale si può creare un

impianto dentale ad hoc, sia fisso che mobile. Il titanio grado 2 (Ti Cp), in particolare, è un materiale estremamente indicato in ambito odontoiatrico grazie alla sua elevata bio-tollerabilità ed alle sue particolari caratteristiche (non è soggetto a corrosione perché a contatto con l'ossigeno passiva formando una pellicola di ossidi che, oltre ad essere estremamente tenace, ha un'azione batteriostatica ed assicura la facile rimozione di placca e tartaro [22, 30, 31, 32]), anche meccaniche (resistenza alla masticazione e durezza ottimali per impianti dentali).

Sebbene i primi manufatti in Ti Cp ottenuti con tecnologie *Selective Laser Melting* - SLM non rispondessero a pieno alle caratteristiche meccaniche e superficiali richieste per impianti biomedicali [6], grazie all'incremento esponenziale nella ricerca e sviluppo di queste nuove tecnologie, in brevissimo tempo queste carenze sono state colmate [25, 34].

La possibilità di creare manufatti personalizzati rende le tecniche SFF ideali per la realizzazione di impianti dentali, sia fissi che mobili. La EOS recentemente ha aggiunto le polveri di titanio grado 2 tra i materiali di consumo della M290, rendendo i manufatti generati con tecnica DMLS utilizzabili per impianti dentali quali scheletrati e corone.

È stata svolta una indagine su due campioni prodotti con tecnologia DMLS: un cuboide pieno (per rappresentare un ponte dentale) ed un cilindro cavo (che raffigura una corona dentale) per valutare le caratteristiche superficiali, microstrutturali e di microdurezza del materiale, poiché significativa delle caratteristiche meccaniche tensionali (snervamento). Il confronto con campioni realizzati mediante un processo di fusione classico (un blocchetto rettangolare pieno ed una corona cava), ha evidenziato che la finitura superficiale dei campioni generati in additive è superiore rispetto a quella delle controparti da fusione benché non perfetta. Si osservano poche e limitate porosità superficiali sia sul cuboide, che sul cilindro cavo. Dall'analisi superficiale di quest'ultimo campione è emersa l'esistenza di alcune rare zone con particelle parzialmente decoese. I manufatti ottenuti con processo DMLS ad ogni modo non mostrano ritiri superficiali, al contrario dei corrispettivi generati da fusione, presenti specialmente nel blocchetto pieno da fusione. Le scabrosità rilevate sul cilindro sono maggiori rispetto a quelle riscontrate nel cuboide, ma decisamente inferiori a quelle osservate sulle superfici delle due controparti ottenute da fusione. Per questo motivo, una eventuale corona generata via DMLS, necessiterà di un processo per la finitura superficiale, ad esempio una sabbiatura.

Le microstrutture dei campioni generati DMLS sono più uniformi, benché non manchino qualche porosità e/o limitate zone con mancanza di fusione, rispetto alle controparti da fusione. La microstruttura del cuboide è omogenea martensitica (α'), al contrario di quella del blocchetto ottenuto con processo di fusione che, oltre a rivelare numerose e piccole porosità, cambia dalla superficie verso l'interno passando da un continuo di grani α grossolani ed equiassici fino ad evolvere in una α aciculare fine all'interno del blocco.

L'isotropia rilevata nel cuboide implica che i manufatti in titanio grado 2 creati con processo DMLS mostrano una saldabilità maggiore rispetto a quella degli omologhi prodotti da fusione e da lavorazione: nelle saldature effettuate sui prodotti realizzati in DMLS non nasceranno tensioni. La saldabilità di questo materiale, prodotto via DMLS, è migliore anche dei corrispettivi generati con tecniche SFF, ma in Ti-6Al-4V.

Per quanto concerne la microdurezza Vickers ($\mu HV_{50,10}$), significativa delle proprietà meccaniche, quelle dei campioni in *additive* si sono rivelate molto superiori (variano da 271 fino a 310) rispetto a quelle delle controparti da fusione (al massimo 225) probabilmente perché il prodotto da SFF non subisce le deformazioni che invece può presentare il titanio fuso durante la fase del raffreddamento. I manufatti generati con processo AM mostrano quindi una più elevata resistenza all'usura poiché la durezza è maggiore di quella delle controparti realizzate con processo di fusione.

L'analisi superficiale e microstrutturale dei manufatti SFF mostra quindi difettologie limitate, molto inferiori a quanto si riscontra nei campioni creati con processo classico di fusione. Questo significa che la resistenza a fatica, in particolare per un eventuale ponte dentale, è maggiore nei prodotti da AM che saranno da preferire ad omologhi realizzati via fusione.

I prodotti da additive avendo una durezza maggiore, mostrano una migliore resistenza all'usura, elemento essenziale per impianti dentali e corone visto che durante la masticazione (o se il paziente è affetto da bruxismo) sono sottoposti ai carichi tempovarianti che potrebbero compromettere la funzionalità.

In conclusione, dal confronto tra due campioni di Ti Cp realizzati mediante il ben noto processo di fusione ed altrettanti provini generati tramite tecnologia AM, è emerso che le caratteristiche meccaniche e superficiali sono migliori nei manufatti generati con procedimento *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS.

Quest'ultimo metodo quindi si rivela estremamente promettente in ambito odontoiatrico, giacché permette di generare un prodotto ottimale per impianti dentali, sia in termini di caratteristiche meccaniche (che risultano superiori rispetto a quelle dei campioni generati con le ben note metodologie classiche, quale ad esempio la fusione) sia in termini di morfologia superficiale che risulta più uniforme anche se non mancano alcune asperità, comunque di dimensioni e in numero molto limitate rispetto a quelle riscontrate sui provini realizzati con tecnica di fusione classica.

Anche in relazione ai costi queste nuove metodologie presentano vantaggi: si possono creare numerose corone e ponti dentali in un unico *job*, riducendo costi e tempi di produzione [3]. Sebbene i macchinari AM abbiano un costo d'acquisto elevato, l'odontoiatra può affidare la produzione degli impianti da realizzare ad un'azienda terza che ne possiede di adeguati, sfruttando la *reverse engineering* e fornendo dei semplici files con le impronte 3D dei pazienti per la realizzazione dei manufatti.

Ringraziamenti

Si ringraziano la EOS Ltd. per la concessione all'uso delle immagini e figure e l'Istituto Italiano della Saldatura per la collaborazione e la gentile concessione all'uso di alcune immagini e fotografie.

Bibliografia

- [1] P. Oyar (2018) *Laser Sintering Technology and Balling Phenomenon*. Photomedicine and Laser Surgery, Vol. 36 (2): 1-6.
- [2] R. Van Noort (2012) *The future of dental devices is digital*. Dent Mater, 28: 3–12.
- [3] K. Kellens, M. Baumers, T. G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset and J. R. Duffou (2017) *Environmental Dimensions of Additive Manufacturing - Mapping Application Domains and Their Environmental Implications*. Journal of Industrial Ecology, Vol. 00, Num. 0: 1-20.
- [4] Sateesh, N. H.; Mohan Kumar, G. C.; Prasad, K.; Srinivasa, C. K. & Vinod, A. R. (2014) *Microstructure and mechanical characterzantion of laser sintered Inconel-625 superalloy*. Procedia Materials Science 5: 772-779.
- [5] I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker (2015) *Additive Manufacturing Tecno-logies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second Edition* Springer, New York.
- [6] Attar, H.; Calin, M.; Zhang, L.C.; Scudino, S.; Eckert, J. (2014) *Manufac-ture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium*. Materials Science & Engineering A, Vol. 593: 170–177.
- [7] Dawes, J.; Bowerman, R.; Trepleton, R. (2015) *Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. Exploring the production and supply of metal powders for AM processes*. Johnson Matthey Technol. Rev., N. 59(3): 243–256.
- [8] Laser Institute of America, (2001) *Rapid Prototyping*, in: "LIA Handbook of Laser Materials Processing", editor in chief: John F. Ready, associate editor: Dave F. Farson: 541-582.
- [9] K. P. Karunakaran, A. Bernard, S. Suryakumar, L. Dembinski, G. Taillandier (2012) *Rapid manufacturing of metallic objects*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 18, pp. 264 - 280.
- [10] R. J. Friel, R. A. Harris (2013) *Ultrasonic additive manufacturing: a hybrid production process for novel functional products*. Elsevier, Procedia CIRP, Vol.6: 35–40.

- [11] C. Y. Kong R. C. Soar (2005) *Fabrication of metal–matrix composites and adaptive composites using ultrasonic consolidation process*. Materials Science and Engineering: A, Vol. 412, Issues 1–2: 12–18.
- [12] M. Feygin, B. Hsieh (1991) *Laminated Object Manufacturing (LOM): A Simpler Process*, paper presented at Second Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, August 6–8.
- [13] A. Simchi, F. Petzoldt, H. Pohl (2001) *Direct metal laser sintering: material considerations and mechanisms of particle bonding*. Int J Powder Metall, Vol. 37:49–61.
- [14] C.Y. Kong and R.C. Soar (2005) *Fabrication of metal–matrix composites and adaptive composites using ultrasonic consolidation process*. Materials Science and Engineering A, Vol. 412: 12–18.
- [15] Y. Yan, S. Li, R. Zhang, F. Lin, R. Wu, Q. Lu, Z. Xiong, X. Wang (2009) *Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative techniques, applications, and development trends*. Tsinghua Science & Technology, Vol. 14: 1–12.
- [16] P.F. Jacobs (1995) *Stereolithography and other RP and M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling*. SME, New York.
- [17] E. M. Sachs, M. J. Cima, P. Williams, D. Brancazio, J. Cornie (1992) *Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model*. J Eng Ind 114(4): 481–488.
- [18] Engelhart,S.; Segal, R. J. (2017) *Allergic Reaction to Vanadium Causes a Diffuse Eczematous Eruption and Titanium Alloy Orthopedic Implant Failure*. Cutis, Vol. 99: 245–249.
- [19] Rodríguez-Mercado, J. J.; Altamirano-Lozano M. A. (2006) *Vanadio: contaminación, metabolismo y genotoxicidad*. Rev. Int. Contam. Ambient., Vol. 22(4): 173–189.
- [20] Geetha, M.; Singh, A.K.; Asokamani, R.; Gogia, A.K. (2009) *Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - A review*. Prog. Mater. Sci. 54: 397–425.
- [21] S. Nag, S.; Banerjee, R.; Fraser, H.L. (2005) *Microstructural evolution and strengthening mechanisms in Ti–Nb–Zr–Ta, Ti–Mo–Zr–Fe and Ti–15Mo biocompatible alloys*. Mater. Sci. Eng. C., Vol.25: 357–62.
- [22] Cito, C.; Andreasi Bassi, A.; Di Rocco A.(1998) *Monometallismo in implantoprotesi*. Materiali dentali, Dental Cadmos I/99.
- [23] ASTM F67-13 (2017) Standard Specification for Unalloyed Titanium, for Surgical Implant Applications (UNS R50250, UNS R50400, UNS R50550, UNS R50700).

- [24] https://cdn.eos.info/7525d0508db5d391/06402dc1c926/TiCP_M290_Material_data_sheet_05-16_FlexLine_en.pdf Consultato dicembre 2017
- [25] Gu, D.; Hagedorn, Y-C.; Meiners, W.; Meng, G.; Batista, R.J.S.; Wisenbach, K.; Poprawe, R. *Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium* (2012) *Acta Materialia*, Vol. 60: 3849–3860.
- [26] ASTM E 407-07(2015)e1 - *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. ASTM International Standard.
- [27] ASTM E 340-15 *Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys*. ASTM International Standard.
- [28] ISO 20160:2006 - *Implants for surgery. Metallic materials. Classification of microstructures for alpha+beta titanium alloy bars*.
- [29] <https://www.eos.info/en>
- [30] M. Shimakura, S. Yamada, M. Takeuchi, K. Miura and J. Ikeyama (2009) *Influence of irradiation conditions on the deformation of pure titanium frames in laser welding*. *Dental Materials Journal*, Vol. 2: 243-247.
- [31] J. Senthil Selvan, K. Subramanian, A.K. Nath, A.K. Gogia, A.K. Balamurugan, and S. Rajagopal (1998) *Hardness, Microstructure and Surface Characterization of Laser Gas Nitrided Commercially Pure Titanium Using High Power CO₂ Laser*. *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 7: 647-655.
- [32] A. T. Sidambe (2014) *Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants — A Review* *Materials*, Vol. 7(12): 8168-8188.
- [33] (2015) *EOS promotes 3D printing at dental show*. *Metal Powder Report*, Vol. 70, Num. 3.
- [34] Attar, H.; Prashanth, K.G.; Chaubey, A.K.; Calin, M.; Zhang, L.C.; Scudino, S.; Eckert, J. (2015) *Comparison of wear properties of commercially pure titanium prepared by selective laser melting and casting processes*. *Materials Letters*, Vol.142: 38-41.
- [35] C. Deckard and J. J. Beaman (1988) *Process and control issues in selective laser sintering*. *ASME Prod Eng Div* 33 : 191–197.
- [36] Yan, Y.; Li, S.; Zhang, R.; Lin, F.; Wu, R.; Lu, Q.; Xiong, Z.; Wang, X. (2009) *Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends*. *Tsinghua Science & Technology*, Vol. 14: 1-12.
- [37] Ashley, S. (1991) *Rapid prototyping systems*. *Mech. Eng.*, 113(4): 34.
- [38] Cooper, K. (2001) *Rapid Prototyping Technology* Marcel Dekker, New York.

- [39] Kruth, J.-P. (1991) *Material in-process manufacturing by rapid prototyping techniques*. CIRP Ann. Manuf. Technol., 40(2): 603–614.
- [40] Slotwinski, J. A. and Garboczi, E. J. (2015) *Metrology Needs for Metal Additive Manufacturing Powders*. JOM, Vol. 67, No. 3: 538-543.
- [41] Picariello, P. (2009) *Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies*. ASTM International, West Conshohocken, PA, <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>.
- [42] <https://wohlersassociates.com/scanning.html>
- [43] Srivatsan, T.S.; Manigandan, K. and Sudarshan, T.S. (2016) *Additive Manufacturing of Materials Viable Techniques, Metals, Advances, Advantages, and Applications* Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications; CRC press, Taylor & Francis Group, LLC, Chapter 1: 1-48.
- [44] <http://www.rm-platform.com/> (consultato il 21 ottobre 2017).
- [45] <http://www.aita3d.it/> (consultato il 21 ottobre).
- [46] Mahamood, R. M. and Akinlabi E.T. (2017) *Additive Manufacturing of Functionally Graded Materials*. In: *Functionally Graded Materials*. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. Springer, Cham, Vol.1(4): 47-68.
- [47] Mahamood, R. M.; Akinlabi, E. T. *et al.* (2012) *Functionally Graded Material: An Overview* Proceedings of the World Congress on Engineering (2012), Vol. III, July 4 - 6, London (U.K.)
- [48] Sharma, A.; Bandari, V.; Ito, K.; Kohama, K.; Ramji, M. and BV, H.S. (2017) *A new process for design and manufacture of tailor-made functionally graded composites through friction stir additive manufacturing*. J Manuf Process, Vol.26: 122–30.
- [49] Ngo, T. D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K. T. Q. and Hui, D. (2018) *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites Part B: Engineering, Vol. 143: 172-196.
- [50] Gibson, I.; Rosen, D. and Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second Edition* Springer, New York (2015).
- [51] <http://www.solidworks.it/> oppure <http://www.solidworks.com> (visitato il 27/10).
- [52] www.materialise.com/it/software/magics oppure <http://www.materialise.com/en/software/magics-3d-printing-software> (visitato il 27/10).

- [53] Kumar, V. and Dutta, D. (1997) *An assessment of data formats for layered manufacturing*. Adv. Eng. Software, 28: 151–164.
- [54] Park, J.; Tari, M.J. and Hahn, H.T. (2000) *Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process*. Rapid Prototyp J 6(1):36–49.
- [55] <https://www.3dsystems.com/> o per l'Italia <https://it.3dsystems.com/>
- [56] Beaman, J.J.; Barlow, J.W.; Bourell, D.L.; Crawford, R.H.; Marcus H.L. and McAlea, K.P. (1996) *Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing*. Springer, New York.
- [57] Jacobs, PF (1995) *Stereolithography and other RP and M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling*. SME, New York.
- [58] Sachs, EM; Cima, MJ; Williams, P; Brancazio, D and Cornie, J (1992) *Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model*. J Eng Ind 114(4): 481–488.
- [59] Feygin, M. and Hsieh, B. (1991) *Laminated Object Manufacturing (LOM): A Simpler Process*, paper presented at Second Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, August 6–8.
- [60] Sanpo, N.; Wang, J. and Berndt, C. C. (2013) *Feedstock Material Considerations for Thermal Spray*. ASM International®, ASM Handbook, Thermal Spray Technology, Vol.5A: 93-120.
- [61] Lagutkin, S.; Achelis, L.; Sheikhaliev, S.; Uhlenwinkel, V.; Srivastava, V. (2004) *Atomization process for metal powder* Materials Science and Engineering, Vol.383(1): 1-6.
- [62] Savage, S. J. and Froes, F. H. (1984) *Production of Rapidly Solidified Metals and Alloys*. Journal Of Metals, Vol. 36(4): 20–33.
- [63] Upadhyaya, G. S. (2002) *Powder Metallurgy Technology* Cambridge International Science Publishing, pp: 10-15.
- [64] Atwood, C.; Ensiz, M; Greene, D. et al (1998) *Laser engineered net shaping (LENS®): a tool for direct fabrication of metal parts*. Paper presented at the 17th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Orlando, 16–19 November 1998. <http://www.osti.gov/energycitations>
- [65] Mudge, R.P. and Wald, N.R. (2007) *Laser engineered net shaping advances in additive manufacturing and repair*. Weld. J., 86: 44–48.
- [66] Optomec. LENS process. <http://www.optomec.com>
- [67] Costa Santos, E.; Shiomi, M.; Osakada, K. and Laoui, T. (2006) *Rapid manufacturing of metal components by laser forming*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46: 1459-1468.

- [68] Karunakaran, K. P.; Bernard, A.; Suryakumar, S.; Dembinski, L.; Taillandier, G. (2012) *Rapid manufacturing of metallic objects* Rapid Prototyping Journal, Vol. 18, pp. 264 - 280.
- [69] Gong, X.; Anderson, T.; Chou, K.(2012)*Review on Powder-Based Electron Beam Additive Manufacturing Technology*. ASME. International Symposium on Flexible Automation, ASME/ISCIE International Symposium on Flexible Automation :507-515. doi:10.1115/ISFA2012-7256
- [70] https://cdn.eos.info/b35072c36ea3d7fd/a370ce165029/NiAl1-IN625-M290_Material_data_sheet_06-17_en.pdf. Visitato a giugno 2018.
- [71] Stapleton, T. J.; Krouse, D.; Laliberte, Y. J. (2015) *Additive Manufacturing Technology to Enhance Environmental Control Life Support (ECLS) Equipment Performance While Reducing Its Weight and Volume*. 45th International Conference on Environmental Systems ICES-2015-198 12-16 July 2015, Bellevue, Washington
- [72] Gaytan, S. M.; Murr, S. E.; Medina, F.; Martinez, E.; Lopez, M. I. and Wicker, R. B. (2009) *Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting*. Materials Technology, Advanced Performance Materials, Vol. 24(3): 180-190.
- [73] Laser Institute of America, (2001) *Rapid Prototyping*, In: "LIA Handbook of Laser Materials Processing", editor in chief: John F. Ready, associate editor: Dave F. Farson: 541-582.
- [74] Kruth, J.-P.; Mercelis, P.; Van Vaerenbergh, J.; Froyen, L.; Rombouts, M. (2005) *Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting*. Rapid Prototyping Journal, Vol.11(1): 26-36.
- [75] Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D. *et al.* (2015) *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81: 465-482.
- [76] DebRoy, T., Wei, H. L.; Zuback, J. S.; Mukherjee, T. et al (2018) *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties*. Progress in Materials Science, Vol. 92: 112–224.
- [77] Mahamood R.M., Akinlabi E.T. (2017) *Types of Functionally Graded Materials and Their Areas of Application* Functionally Graded Materials. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. Springer, Cham: 9-21.
- [78] Mahamood, R. M.; Akinlabi, E. T.; Shukla, M. and Pityana, S. (2012) *Functionally Graded Material: An Overview*. Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. III, WCE 2012 - July 4 - 6, 2012; London, U.K.

- [79] Kruth, J.-P.; Dadbakhsh, S.; Vrancken, B.; Kempen, K.; Vleugels, J. and Van Humbeeck, J (2015) *Additive Manufacturing of Metals via Selective Laser Melting: Process Aspects and Material Developments* Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications; CRC press, Taylor & Francis Group, LLC, Chapter 3: 69-99.
- [80] R. Knoppers, J. W. Gunnink, J. Van den Hout, and W. Van Vliet (2004) *The reality of functionally graded material products*. TNO Science and Industry, The Netherlands, pp 38-43.
- [81] Friel, R. J. and Harris, R. A.(2013) *Ultrasonic additive manufacturing: a hybrid production process for novel functional products*. Elsevier, Procedia CIRP, Vol.6: 35–40.
- [82] Kong, C. Y. and Soar, R.C. (2005) *Fabrication of metal–matrix composites and adaptive composites using ultrasonic consolidation process* Materials Science and Engineering: A, Vol. 412, Issues 1–2: 12-18.
- [83] Janaki Ram, G.D.; Robinson, C.; Yang Y. and Stucker, B.E.(2007) *Use of ultrasonic consolidation for fabrication of multi-material structures*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 13(4): 226–235.
- [84] Abe, F.; Osakada, K.; Shiomi, M. and Matsumoto, M. (2001) *The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting*. Journal of Material Processing Technology 111: 210-213.
- [85] Gusarov, A.V.; Laoui, T.; Froyen, L.; Titov, V.I. and Tolochko, N.K. (2001) *Numerical simulation of laser solid state sintering of loose titanium powder*. Proc. 10th Europ. Conf. on Rapid Prototyping and Manufacturing, 7-8 June 2001, Paris, France. Quoted by [74]
- [86] Kruth, J.-P.; Badrossamay, M.; Yasa, E.; Deckers, J.; Thijs, L. and Van Humbeeck, J. (2010) *Part and Material Properties in Selective Laser Melting of Metals*. paper presented at 16th International Symposium on Electromachining (ISEM XVI), Shanghai, China, April 19–23.
- [87] Utela, B.; Storti, D.; Anderson, R. and Ganter, M. (2008) *A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)*. Journal of Manufacturing Processes, Vol.10: 96-104.
- [88] Gu, D. & Shen, Y. (2006) *Processing and microstructure of submicron WC-Co particulate reinforced Cu matrix composites prepared by direct laser sintering*. Mater. Sci. Eng. A, 435–436: 54–61.
- [89] Gu, D. & Shen, Y. (2009) *Effects of processing parameters on consolidation and microstructure of W–Cu components by DMLS*. J. Alloys Compd., 473(1–2): 107–115.
- [90] Olakanmi, E.O. (2013) *Selective laser sintering/melting(SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: effect of processing conditions and powder properties*. J. Mater. Process. Technol., 213(8):1387–1405.

- [91] Delgado, J.; Ciurana, J.; Rodríguez, C.A. (2012) *Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials*. Int J Adv Manuf Technol 60: 601–610.
- [92] Dewidar, M.M.; Lim, J.K.; Dalgarno, K.W. (2008) *A comparison between direct and indirect selective laser sintering of metals*. J. Mater. Sci. Technol., Vol. 24(2): 227–232.
- [93] Kathuria, Y.P. (1999) *Microstructuring by selective laser sintering of metallic powder*. Surface and Coatings Technology 116–119: 643–647.
- [94] Calignano, F.; Manfredi, D.; Ambrosio, E. P.; Iuliano, L.; Fino, P. (2013) *Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS* Int J. Adv Manuf Technol, Vol. 67, Number 9-12: 2743–2751.
- [95] Meiners, W.; Wissenbach, K.; Poprawe R. (1996) *Proceedings of ECLAT*, Stuttgart, Germany: 879–886, quoted by Kathuria *et al.* [93].
- [96] J.D. Kim, B.C. Jun, *Proceedings of 30th ISATA*, Florence, Italy (1997) 201–209. Quoted by Kathuria *et al.* [93].
- [97] Ion, J.C. (2005). Keyhole welding. *Laser Processing of Engineering Materials* (Ion, J.C., Ed.), Chap. 16. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [98] Spierings, A. B.; Herres, N. & Levy, G. (2011) *Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts*. Rapid Prototyp J, Vol. 17(3): 195-202.
- [99] Rehme, O. (2006) *Selective Laser Melting offenzellulärer Struktruen und Struktruen und Charakterisierung ihrer mechanischen Eigenschafte*, WLT Laser-Summerschool, ed, Institute of Laser and System Technologies, Hamburg University of Technology, Hamburg. Quote by Spierings *et al.* in [98].
- [100] Yasa, E.; Deckers, J.; Kruth, J.-P.; Rombouts, M. & Luyten, J. (2009) *Experimental Investigation of Charpy Impact Tests on Metallic SLM parts*. The Int. Conf. on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping VRAP, Leiria, Portugal, 207-214.
- [101] Badrosamay, M.; Yasa, E.; Van Vaerenbergh, J. and Kruth, J. P. (2009) *Improving productivity rate in SLM of commercial steel powders*. Paper presented at RAPID Conference & Exposition, Schaumburg, IL, May. Quote by Spierings *et al.* in [98].
- [102] Hitzler, L.; Merkel, M.; Hall, w.; & Öchsner, A. (2018) *A Review of Metal Fabricated with Laser- and Powder-Bed Based Additive Manufacturing Techniques: Process, Nomenclature, Materials, Achievable Properties, and its Utilization in the Medical Sector*. Advanced Engineering Materials, DOI: 10.1002/adem.201700658.

- [103] Wang, D.; Yang, Y.; Sun, X. & Chen, Y. (2013) *Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM)*. Journal of Materials Processing Technology 213 (10): 1734–1742.
- [104] *EN ISO 17296.3:2016 - "Additive manufacturing - General principles - Part 3: Main characteristics and corresponding test methods"*.
- [105] Seifi, M.; Salem, A.; Beuth, J.; Harrysson, J. & Lewandowski, J. J. (2016) *Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing*. JOM, Vol. 68 (3): 747-764.
- [106] D.H. Abbott (2015) *SAE Specification Summit*, quoted by *Seifi et al.* in[105]
- [107] Seifi, M.; Gorelik, M.; Waller, J.; Hrabe, N.; Shamsaei, M; Daniewicz, S. & Lewandowski, J. J. (2017) *Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification*. JOM, Vol. 69(3): 439-455.
- [108] Cebon, D.; Shercliff, H.; Ashby M. F. (2009) *Materiali. Dalla scienza alla progettazione ingegneristica*. Zanichelli editore.
- [109] <https://www.eos.info/en>. Consultato ad aprile 2018.
- [110] Thompson, A.; Maskery I. & Leach R. K. (2016) *X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review*. Meas. Sci. Technol. 27(7).
- [111] Waller, J. M.; Parker, B. H.; Hodges, K. L.; Burke, E. R. & Walker, J. L. (2014) *Nondestructive Evaluation of Additive Manufacturing. State-of-the-Discipline Report*. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140016447> visited may 2018.
- [112] Waller, J. M.; Saulsberry, R. L.; Parker, B. H.; Hodges, K. L.; Burke, E. R. & Taminger, K. M. (2015) *Summary of NDE of Additive Manufacturing Efforts in NASA*. 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Conf. Proc. 1650, 51-62.
- [113] Kinney, J. H. & Nichols, M. C. (1992) *X-ray tomographic microscopy (XTM) using synchrotron radiation*. Annual Review of Materials Science, Vol.22: 121-152.
- [114] *Non destructive evaluation and quality control*, ASM metals handbook, Vol. 17.
- [115] Lopez, A.; Bacelar, R.; Pires, I; Santos, T. G.; Sousa, J. P. & Quintino, L. (2018) *Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, Vol.21: 298-306.
- [116] Rieder, H.; Dillhöfer, A.; Spies, M.; Bamberg, J. & Hess, T. (2015) *Ultrasonic online monitoring of additive manufacturing processes based on selective laser melting*. AIP Conference Proceedings 1650, 184.

- [117] Zenzinger, G.; Bamberg, J.; Ladewig, A.; Hess, T.; Henkel, B. & Satzger W. (2015) *Process Monitoring of Additive Manufacturing by Using Optical Tomography* AIP Conference Proceedings 1650: 164-170.
- [118] Strantza, M.; Aggelis, D. G.; De Baere, D.; Guillaume, P. & Van Hemelrijck, D. (2015) *Evaluation of SHM System Produced by Additive Manufacturing via Acoustic Emission and Other NDT Methods*. Sensors, 15(10): 26709-26725.
- [119] Hrabe, N.; Barbosa, N.; Daniewicz, S. R. & Shamsaei, N. (2016) *Findings from the NIST/ASTM Workshop on Mechanical Behavior of Additive Manufacturing Components*, in *NIST Advanced Manufacturing Series*.
- [120] *Standard Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloy (UNS N06625) and Nickel-Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy (UNS N066219) Plate, Sheet, and Strip*.
- [121] *Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion*.
- [122] Seifi, M.; Lewandowski, J. J. (2016) *Metal Additive Manufacturing: a review of mechanical properties.*, Annu. Rev. Mater. Res, 46: 14.1-14.36.
- [123] Gonzalez, J.A.; Mireles, J.; Stafford, S.W.; Perez, M. A.; Terrazas, C.A.; Wicker, R.B. (2019) *Characterization of Inconel 625 fabricated using powder-bed-based additive manufacturing technologies*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 264: 200-210.
- [124] Poulin J.-R.; Brailovski, V.; Terriault, P. (2018) *Long fatigue crack propagation behavior of Inconel 625 processed by laser powder bed fusion: Influence of build orientation and post-processing conditions*. International Journal of Fatigue, 116: 634-647.
- [125] Li, C.; White, R.; Fang, X. Y.; Weaver, M.; Guoa, Y.B. (2017) *Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment*. Materials Science and Engineering: A, Vol. 705: 20-31.
- [126] Dinda, G.P.; Dasgupta, A.K.; Mazumder, J. (2009) *Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability*. Elsevier Materials Science and Engineering: A, Vol. 509, (1-2): 98-104.
- [127] Marchese, G.; Colera, X.G.; Calignano, F.; Lorusso, M.; Biamino, S.; Minetola, P.; Manfredi, D. (2017) *Characterization and Comparison of Inconel 625 Processed by Selective Laser Melting and Laser Metal Deposition*. Advanced Engineering Materials, Vol. 19(3): n/a-n/a.
- [128] Kreitchberg, A.; Brailovski, V.; Turenne, S. (2017) *Effect of heat treatment and hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy processed by laser powder bed fusion*. Mater Sci Eng, A, Vol. 689: 1-10.

- [129] Kreitsberg, A.; Brailovski, V.; Turenne, S. (2017) *Elevated temperature mechanical behavior of IN625 alloy processed by laser powder-bed fusion*. Mater Sci Eng, A, Vol. 700: 540–553.
- [130] Gordon, G. M. (1977) *Physical Metallurgy of Fe-Cr-Ni Alloys*. Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys. Editors: Staehle, R. W.; Hochmann, J.; McCright, R. D.; Slater, J. E.: 893-945.
- [131] *F2921-11: Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies*. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
- [132] *F3122-14: Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes*. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.
- [133] Draper, S. L.; Lerch, B. A.; Telesman, J.; Martin, R. E.; Locci, I. E.; Garg, A. & Ring, A. J. (2016) *NASA/TM-2016-219136: Materials Characterization of Electron Beam Melted Ti-6Al-4V*. NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH United States.
- [134] Beese, A.M. & Carroll, B.E. (2016) *Review of Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Made by Laser-Based Additive Manufacturing Using Powder Feedstock*, JOM, 68: 724.
- [135] Li, P.; Warner, D.H.; Fatemi, A. & Phan, N. (2015) *Critical assessment of the fatigue performance of additively manufactured Ti-6Al-4V and perspective for future research*. International Journal of Fatigue.
- [136] Pedemonte, M.; Palombo, M.; de Marco, M.; Alberini, S.; Marangoni, P.; Fusari, F. (2019) *Caratterizzazione del comportamento a caldo ed a corrosione di semilavorati in Inconel 625 realizzati con tecnologie Additive e saldature mediante processo GTAW/SMAW*. Giornate Nazionali di Saldatura 2019, Genova.
- [137] Everton, S.; Dickens, P.; Tuck, C. & Dutton, B. (2015) *Evaluation of laser ultrasonic testing for inspection of metal additive manufacturing*, Proc. SPIE 9353, Laser 3D Manufacturing II, 935316.
- [138] Maskery, I.; Aboulkhair, N.; Corfield, M.; Tuck, C.; Clare, A.; Leach, R. K.; Wildman, R. D.; Ashcroft, I. & Hague, R. J. (2016) *Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography*. Mater Char, 111: 193–204.
- [139] Fang, Q.T.; Anyalebechi, P.N. & Granger, D.A. *Measurement of hydrogen porosity in unidirectionally solidified aluminum alloys*. Light Metals, The Minerals, Metals and Materials Society, 1988.
- [140] Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E. & Emmelmann, C. (2016) *Additive manufacturing of metals*. Acta Mater, Vol. 117: 371–92.

- [141] Leuders, S.; Thöne, M.; Riemer, A.; Niendorf, T.; Tröster, T.; Richard, H. A. & Maier, H. J. (2012) *On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance*. International Journal of Fatigue, 48: 300-307.
- [142] Koester, L.W.; Taheri, H.; Bigelow, T.A.; Collins, P.C. & Bonds, L. J. (2018) *Nondestructive Testing for Metal Parts Fabricated Using Powder-Based Additive Manufacturing*. Materials Evaluation, Vol.76(4): 514-524.
- [143] Liu, Q.; Elambasseril, J.; Sun, S.; Leary, M.; Brandt, M. & Sharp, P.K. (2014) *The Effect of Manufacturing Defects on The Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Specimens Fabricated Using Selective Laser Melting*. Advanced Materials Research Vols. 891-892: 1519-1524.
- [144] Taheri, H.; Mohammad Shoaib, M.R.; Koester, L.W.; Bigelow, T.A.; Collins, P.C. & Bond, L.J (2017) *Powder-based additive manufacturing – a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology*. Int. J. Additive and Subtractive Materials Manufacturing, Vol. 1, No. 2.
- [145] Shunmugavela, M.; Polishettya, A.; Littlefaira, G. (2015) *Microstructure and mechanical properties of wrought and Additive manufactured Ti-6Al-4V cylindrical bars*. Procedia Technology, Vol.20: 231–236.
- [146] *ASTM F2924 - 14: Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- [147] *ASTM F3001 - 14: Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium Extra Low Interstitial (ELI) with Powder Bed Fusion*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- [148] Wohlers, T. (2017) *3D printing and additive manufacturing state of the industry Annual Worldwide Progress Report Wohlers Report*.
- [149] LENS Blisk Repair Solution. <https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lensemec-emerging-applications/blisk-repair/>. Consultato a giugno 2018.
- [150] <http://www.rep-air.eu/project/>. Consultato a giugno 2018.
- [151] Thomas, D.A.; Snyder, M.P.; Napoli, M.; Joyce, E.R.; Shestople, P.; Letcher, T. (2017) *Effect of acrylonitrile butadiene styrene melt extrusion additive manufacturing on mechanical performance in reduced gravity*. AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, Orlando FL.; AIAA 2017-527810.
- [152] Labeaga-Martínez, N.; Sanjurjo-Rivoa, M.; Díaz-Álvarez, JM-F (2017) *Additive manufacturing for a Moon village*. Procedia Manuf, 13: 794–801.

- [153] Iebba, M.; Astarita, A.; Mistretta, D.; Colonna, I.; Liberini, M.; Scherillo, F.; Pirozzi, C.; Borrelli, R.; Franchitti, S.; Squillace, A. (2017) *Influence of Powder Characteristics on Formation of Porosity in Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Components*. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.26(8): 4138-4147
- [154] Gu, D.; Hagedorn, Y.C.; Meiners, W.; Meng, G.; Batista, R.J.S.; Wissenbach, K. & Poprawe, R. (2012) *Densification Behavior, Microstructure Evolution, and Wear Performance of Selective Laser Melting Processed Commercially Pure Titanium*. Acta Mater., Vol. 60(9): 3849–3860.
- [155] *ASTM F2921-11: Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- [156] *ASTM and ISO Additive Manufacturing Committees Approve Joint Standards Under Partner Standards Developing Organization Agreement*. <https://www.astm.org/cms/drupal-7.51/newsroom/astm-and-iso-additive-manufacturing-committees-approve-joint-standards-under-p> Visitato luglio 2018.
- [157] *ISO / ASTM52921 - 13: Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- [158] *ASTM F2915-11: Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF)* ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- [159] *ISO / ASTM52915-16: Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- [160] Monzón, M.; Paz, R.; Ortega, Z. & Diaz, N. (2019) *Knowledge Transfer and Standards Needs in Additive Manufacturing*. In: Pei, E.; Monzón, M.; Bernard, A. (eds) *Additive Manufacturing – Developments in Training and Education*. Springer, Cham: 1-13.
- [161] Feenstra, F.; Boivie, K.; Verquin, B.; Spierings, A.; Buining, H. & Schaefer, M. (2014) *Road map for additive manufacturing*. Resource document. SASAM project FP7–NMP–2012-CSA-6–319167. www.AM-Platform.com
- [162] Bourell, D.L.; Leu, M.C. & Rosen, D.W. (2009) *Roadmap for additive manufacturing - identifying the future of freeform processing*. <http://wohlersassociates.com/roadmap2009.pdf>. Visitato a luglio 2018.
- [163] AM Platform (2014) *Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda*. <http://www.rm-platform.com/linkdoc/AM%20SRA%20-%20February%202014.pdf>. Visitato luglio 2018.

- [164] Hatto, P. (2017) *Standards and Standardisation. A practical guide for researchers*. Resource document. European Commission. https://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/practicalstandardisation-guide-for-researchers_en.pdf. Consultata luglio 2018.
- [165] Yang, L. (2019) *Introducing the State-of-the-Art Additive Manufacturing Research in Education*. In: Pei, E.; Monzón, M.; Bernard, A. (eds) *Additive Manufacturing – Developments in Training and Education*. Springer, Cham: 53-65.
- [166] Boivie, K. (2019) ‘What is in a Word?’ — *The Use and Background for Terms and Definitions in Additive Manufacturing*. In: Pei, E.; Monzón, M.; Bernard, A. (eds) *Additive Manufacturing – Developments in Training and Education*. Springer, Cham: 151-169.
- [167] *ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing — General principles—Terminology*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>. Consultata luglio 2018.
- [168] <https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report/FILE/ey-global-3d-printing-report-2016-full-report.pdf>. Consultato a luglio 2018.
- [169] http://ec.europa.eu/education/policy/vocational-policy_en. Visitato a luglio 2018.
- [170] Assunção, E.G.; Silva, E.R. & Pei, E. *Professional Training of AM at the European Level*. In: Pei, E.; Monzón, M.; Bernard, A. (eds) *Additive Manufacturing – Developments in Training and Education*. Springer, Cham: 211-217.
- [171] (2017) *ADMIRE - European master degree in metal additive manufacturing (A.M.)* ADMIRE. <http://admireproject.eu>.
- [172] (2017) *CLLAIM - European AM qualification body and European harmonized qualification system*. <http://cllaimprojectam.eu>. Consultato a luglio 2018.
- [173] *European technology platform in additive manufacturing*. <http://www.rm-platform.com>. Consultato luglio 2018.
- [174] *The European credit system for vocational education and training (EC-VET)*. https://ec.europa.eu/education/policy/vocational-policy/ecvet_en. Consultato luglio 2018.
- [175] *European skills/ competences, qualifications and occupations*. <https://ec.europa.eu/esco/portal/home>. Consultato a luglio 2018.

- [176] (2018) *Descriptors defining levels in the European Qualifications Framework (EQF)*. <https://ec.europa.eu/ploteus/en/content/descriptors-page>. Consultato a luglio 2018.
- [177] *AMable Project*. <https://www.amable.eu/>. Consultato a luglio 2018.
- [178] *AM-motion Project*. <http://www.am-motion.eu/>. Consultato a luglio 2018.
- [179] (2018) <http://admireproject.eu/news.html>. Consultato a luglio 2018.
- [180] CECIMO (2015) *Additive manufacturing on its way to industrialisation—A game changer?* http://www.cecimo.eu/site/fileadmin/Magazine/CECIMO_magazine_AM_edition_2015.pdf. Consultato luglio 2018.
- [181] CECIMO (2016) *Additive Technologies: new skills and new jobs*. <http://www.metalsalliance.eu/it/2016/07/workshop-additive-technologies-new-skills-and-new-jobs/>. Consultato a luglio 2018.
- [182] (2018) *CECIMO and AM-Motion partner together to advance discussions on additive manufacturing financing aspects*. http://www.cecimo.eu/site/publications/news/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=421&cHash=bb8bc3ed85415a11cf7ce0a8acc9a365. Consultato a luglio 2018.
- [183] Diegel, O.; Nordin, A. & Motte, D. (2019) *Teaching Design for Additive Manufacturing Through Problem-Based Learning*. In: Pei, E.; Monzón, M.; Bernard, A. (eds) *Additive Manufacturing – Developments in Training and Education*. Springer, Cham: 139-149.
- [184] Geerts, F. & Renda, V. (2018) *The Machine Tool Industry's Changing Skills Needs: What is the Impact of Additive Manufacturing Technologies?* In: Pei, E.; Monzón, M.; Bernard, A. (eds) *Additive Manufacturing – Developments in Training and Education*. Springer, Cham:
- [185] <http://www.metalsalliance.eu/>. Consultato a luglio 2018.
- [186] http://www.cecimo.eu/site/publications/news/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=409&cHash=ad95582a6fbcd2c15357be38bff8233b. Consultato luglio 2018.
- [187] Pedemonte, L.C. (2019) *Metal Additive Manufacturing - Genesi e generalità dei processi di fabbricazione additiva.*, Istituto Italiano della Saldatura.